UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO

DIPARTIMENTO DI GEOLOGIA E INGEGNERIA MECCANICA,
NATURALISTICA E IDRAULICA PER IL TERRITORIO
- GEMINI -

DOTTORATO DI RICERCA IN MECCANICA AGRARIA - XXI CICLO

ESPLOSIONI DI POLVERI ORGANICHE NATURALI: SVILUPPO DI UNA FORMULA EMPIRICA PER LA PROTEZIONE DI VOLUMI CONFINATI CON SUPERFICI DI SFOGO

SETTORE SCIENTIFICO - DISCIPLINARE AGR / 09

***Coordinatore*:**

Prof. Ing. Danilo Monarca

Tutor:

Ing. Giovanni Santoro

Dottorando

Ing. Vito Tonetto

RINGRAZIAMENTI

Il mio ringraziamento va alla mia famiglia che mi ha sostenuto e aiutato durante il percorso del dottorato di ricerca iniziato tre anni fa.

Ringrazio l'Ing. Giovanni Santoro, il Prof. Danilo Monarca e il Prof. Massimo Cecchini per aver supportato e agevolato i miei progetti di ricerca e le mie scelte professionali.

In particolare desidero ringraziare l'Ing. Baldassare Genova e l'Ing. Massimo Silvestrini del Dipartimento dei Vigili del Fuoco del Ministero dell'Interno per la preziosa collaborazione e per gli esperti consigli.

INDICE

LISTA DELLE FIGURE

LISTA DELLE TABELLE

INTRODUZIONE

La ricerca scientifica affronta un particolare rischio per la sicurezza dei lavoratori addetti a trattare con alcune polveri di origine agricola: l'esplosione. In generale possiamo classificare il pericolo delle polveri in base alla gravità del danno che possono causare: quando quest'ultimo riguarda la salute del lavoratore, parliamo di rischio microclimatico delle polveri; se il danno può provocare effetti sia sulla salute dei lavoratori che sulle strutture dell'ambiente lavorativo parliamo di rischio d'esplosione delle polveri.

Il pericolo di esplosione di polveri organiche naturali riguarda tutte le attività che trattano, processano, utilizzano, producono, miscelano, macinano, caricano, scaricano, immagazzinano materiali organici naturali in forma sciolta o loro sottoprodotti e polveri di graniglie, semi, legumi, farine, spezie, mangimi e altri prodotti simili. Sono inoltre incluse tutte le attività che si occupano di trattare e produrre amido, inclusa l'essiccatura, il trasporto, il confezionamento, l'immagazzinamento di amido e prodotti in polvere essiccati. Esempi di industrie alimentari interessate al problema sono: stabilimenti per la produzione di pane, prodotti correlati e dolci, sollevatori di graniglie alimentari, molini per mangimi e per farine, impianti per la miscelazione ed impianti per le operazioni di preparazione di semi e semi da olio, trattamento dei cereali, del cioccolato, dello zucchero, dei mangimi e alimenti per animali domestici (Norma NFPA 61-2002[a]).

[a] La N.F.P.A. (National Fire Protection Association) è un'organizzazione governativa americana con lo scopo di definire e aggiornare le norme tecniche per garantire la sicurezza antincendio delle attività antropiche (costruzioni, attrezzature, impianti, dispositivi di protezione collettiva ed individuale). La norma NFPA61-2002 riguarda la sicurezza antincendio e protezione dalle esplosioni delle aziende che trattano polveri di origine agricola.

Come vedremo un'esplosione di una nube di polvere combustibile organica ed aria può avvenire soltantop se si verificano contemporaneamente cinque condizioni. Statisticamente un'esplosione avviene all'interno di un'attrezzatura dello stabilimento (esplosione primaria). Se l'esplosione si propaga nello spazio esterno all'attrezzatura, i fenomeni fisici e chimici della propagazione della combustione (espansione dei gas caldi, onde e gradienti di pressione, flusso dei fluidi e turbolenza, scambi di calore per convezione, irraggiamento) possono causare la formazione di una nube di polvere, depositata su superfici orizzontali o sospesa all'interno del compartimento confinato che si trova intorno, che si incendierà e darà luogo ad un'altra esplosione (esplosione secondaria).

Di solito gli effetti di un tale evento accidentale sono largamente più dannosi di quelli di un'esplosione primaria soprattutto a causa dei fenomeni di turbolenza all'interno della nube d'aria e polvere e indotti dall'esplosione primaria.

Uno dei metodi più praticati ed economici per proteggere un compartimento o una attrezzatura dagli effetti di tali esplosioni consiste nella realizzazione di superfici di sfogo , che sono progettate e dimensionate fino ad oggi tenendo conto solo in modo marginale dell'effetto peggiorativo della presenza della turbolenza indotta dall'esplosione primaria. Questi metodi, trascurando il caso peggiore, possono risultare poco efficaci.

In questo lavoro si cercherà una relazione empirica basata su dati sperimentali reperiti nella letteratura tecnica, che lega la componente della velocità turbolenta di combustione ai due parametri caratteristici della violenza dell'esplosione: la massima sovrapressione raggiunta p_{max} [bar g] e la massima variazione di pressione nell'unità di tempo $\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX}$ [bar s^{-1}].

SCOPO E STRUTTURA DELLA TESI

Lo scopo di questa tesi è approfondire lo studio della protezione delle esplosioni di polveri per mezzo di superfici di sfogo, nell'industria delle polveri di origine agricola, sulla base degli studi e degli sviluppi più recenti, soprattutto sul ruolo della turbolenza del flusso sulla propagazione dell'esplosione. Si cercherà di sviluppare un metodo, basato su dati sperimentali, per il dimensionamento degli sfoghi di pressione. La norma americana della National Fire Prevention Association NFPA 68 del 2007 presenta una soluzione per la progettazione delle superfici tenendo conto della turbolenza della nube di polvere e tale metodo sarà confrontato con quello proposto in questo studio.

Nel primo capitolo saranno trattate le conoscenze fondamentali ed introdotti i parametri e le variabili coinvolte nel fenomeno delle esplosioni di polveri organiche naturali, sarà descritta la loro natura e come intervengono nello sviluppo e nella propagazione delle esplosioni.

Il contesto normativo, inteso sia come legislazione cogente sia come legislazione volontaria sarà affrontato nel secondo capitolo: la direttiva sociale 99/92/CE o ATEX 137 (recepita in Italia con il D.Lgs. 233/2003) fissa le regole da seguire per la valutazione dei rischi di esplosioni di gas e di polveri; invece la direttiva di prodotto 94/9/CE o ATEX 100 (recepita in Italia dal D.P.R. 126/1998) definisce i requisiti essenziali sicurezza dei prodotti utilizzati nei luoghi in cui vi è il pericolo di esplosioni di gas e di polveri. Poiché i processi industriali in cui si utilizzano le polveri di origine agricola possono rientrare nel campo delle attività soggette al rilascio del Certificato di Prevenzione Incendi (ai sensi del DPR 37/1998), sarà presentata anche la normativa che regolamenta tale settore e che è soggetta all'autorità del Ministero dell'Interno per mezzo del Dipartimento dei Vigili del Fuoco.

Il quadro normativo sarà completato dalla nuova legge italiana sulla sicurezza sul lavoro e da quella sulla sicurezza degli impianti, che trasportano energia, di tutte le costruzioni a prescindere dalla loro destinazione d'uso (civile o industriale).

I fenomeni della turbolenza ed i suoi effetti sulla pericolosità e sulla propagazione dell'esplosione saranno trattati nel terzo capitolo. Le relazioni matematiche fondamentali e il modello matematico κ-ε più utilizzato per studiare il fenomeno della combustione turbolenta saranno presentati perché verranno utilizzati nel capitolo quinto. Nell'ultima parte verranno descritte le principali similitudini e differenze tra le esplosioni di gas e quelle di polveri per comprendere più in profondità il comportamento meno noto delle polveri.

Nel quarto capitolo si affronta il tema della protezione (mitigazione) delle esplosioni con superfici di sfogo, alle problematiche connesse con la geometria del volume da proteggere e alla presenza di attrezzature ed impianti. Saranno poi esaminate le norme per il dimensionamento delle superfici di sfogo: la NFPA 68-2007 Ed. e la VDI 3673-2002 Ed. L'ampliamento dei risultati di prove di laboratorio ai fenomeni in scala reale costituisce grande importanza per lo scopo di questo studio.

Nel capitolo quinto sarà ricavata la relazione empirica per il dimensionamento delle superfici di sfogo, partendo dai dati riportati in letteratura tecnica. I risultati ottenuti saranno poi confrontati con quelli ottenuti applicando i metodi delle norme NFPA e VDI. I valori di turbolenza dei flussi presenti nelle attrezzature dei processi industriali che trattano polveri, che la letteratura tecnica ha riscontrato in pratica costituiranno un riferimento per le validazione delle correlazioni empiriche trovate.

CAPITOLO 1

IL PERICOLO DI ESPLOSIONE DELLE POLVERI ORGANICHE NATURALI

1.1 GENERALITÀ

Il rischio di esplosione delle polveri di origine agricola, insito nel processo lavorativo che le utilizza, è valutato tenendo conto di due fattori ben noti: la probabilità che avvenga l'esplosione e la gravità dei danni che essa potenzialmente potrebbe causare. Nelle industrie in cui si utilizzano polveri combustibili, la sensibilità dell'esplosione[b] è una misura della probabilità con cui può verificarsi l'evento dannoso e suggerisce una via di prevenire l'esplosione non superando i limiti che delimitano le zone di pericolo (controllo delle sorgenti d'innesco attraverso il parametro MIE, controllo delle lavorazioni a caldo attraverso il parametro MIT). Dall'altra parte, vengono utilizzati alcuni parametri che descrivono la gravità dell'esplosione: la rapidità (variazione di pressione nell'unità di tempo, denominato MRPR) e la violenza dell'esplosione (massima pressione raggiunta durante l'esplosione, velocità della fiamma). In questo caso, la via che porta al rischio residuo accettabile è costituita dalle misure di protezione che è possibile utilizzare.

Per affrontare il pericolo di esplosioni di polveri, cerchiamo di comprendere la complessità del fenomeno, considerando gli aspetti chimici (termodinamica: studia il calore prodotto durante la reazione di combustione; la cinetica invece studia la velocità con cui esso è prodotto)e quelli ingegneristici coinvolti nel fenomeno in esame o nel processo industriale (Figura 1.1). Il loro studio e la loro combinazione aiutano a comprendere il rischio ed il comportamento dell'esplosione. La lettura di questa figura parte dal centro: la **nube di polvere combustibile ed aria** con le sue propretà chimiche (cinetica e termodinamica) e **l'attrezzatura** (ad esempio un silos oppure un impianto di macinazione o di essiccazione o un sistema di trasporto) con le sue caratteristiche ingegneristiche sono i protagonisti del fenomeno preso in considerazione. Se ci muoviamo leggendo il grafico verso l'alto, scopriamo le grandezze chimiche ed ingegneristiche che contribuiscono a determinare la sensibilità dell'esplosione; se invece ci muoviamo verso il

---

[b] La sensibilità dell'esplosione indica la facilità con cui una nube di aria e polvere combustibile può accendersi. Come vedremo più avanti essa è legata a delle grandezze come la minima energia di accensione (MIE) e la minima temperatura di accensione (MIT).

basso, incontriamo le grandezze che determinano la violenza dell'esplosione. In particolare si sottolinea l'importanza della componente della velocità di combustione turbolenta nel produrre gli effetti dannosi, che sarà approfondita nel CAPITOLO 3.

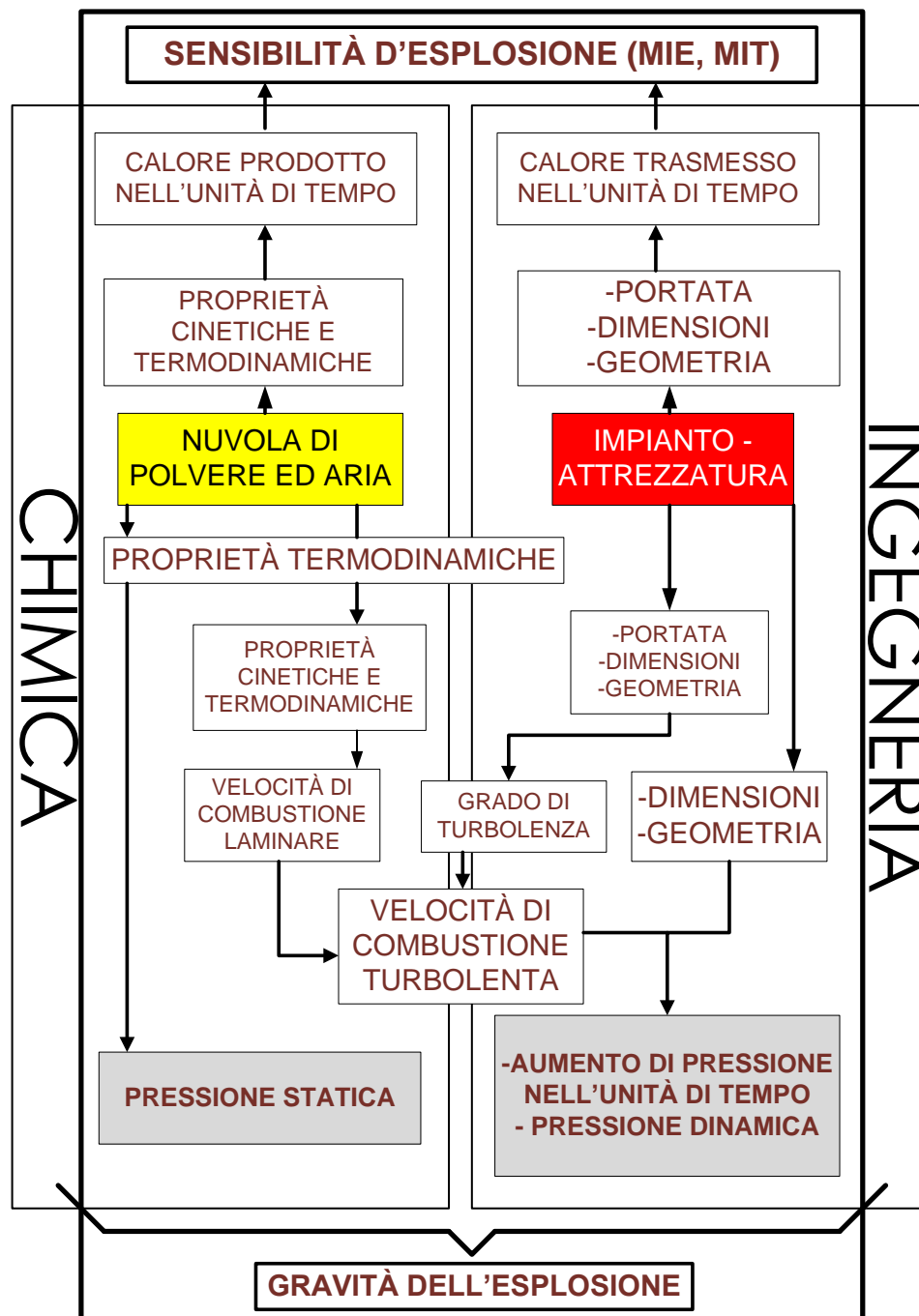



Figura 1.1 – La combinazione degli aspetti chimici e ingegneristici nell'utilizzo industriale delle polveri aiuta a comprendere il rischio ed il comportamento dell'esplosione, Adattato da: Explosion risk approach - University of Technology of Delft.

1.2 PERICOLOSITÀ DI UN'ESPLOSIONE DI POLVERE

Per avere un'idea della pericolosità delle esplosioni di polvere, possiamo fare il confronto tra le sovrapressioni generate dalle esplosioni di gas e quelle delle polveri combustibili: per esempio una miscela stechiometrica aria-metano sviluppa una sovrapressione di valore prossimo agli 8 [bar g], mentre alcune polveri di amido di mais raggiungono perfino i 10 [bar g]. Inoltre, una parete di una costruzione di spessore 20 cm ed alta 2 m realizzata in muratura con mattoni o con blocchi in cemento armato non resiste ad una differenza di pressione tra le due facce maggiore o uguale a 0,03 bar.

Le grandezze utilizzate per individuare la gravità di un'esplosione di polvere sono:

(1) P_{max} massima sovrapressione di esplosione: MEP [bar g]

(2) Massima velocità di crescita della pressione $\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX}$ MRPR

(3) Calore prodotto per mole di O_2 consumata:

Il calore prodotto durante la combustione di un materiale è un parametro importante per capire il pericolo durante un'esplosione eventuale, e lo è ancor più se consideriamo la quantità di ossigeno consumata durante la reazione. Per esempio l'amido di mais[c] bruciando libera circa 470 kJ per mole di ossigeno consumata, invece il calcio libera 1270 kJ per mole di ossigeno consumata.

Le polveri sono classificate in classi di pericolosità in base all'indice di esplosività k_{st} (vedi Paragrafo 1.5).

La dinamica di un'esplosione, ad un livello divulgativo, può essere descritta brevemente come una rapida combustione delle particelle di polvere combustibile disperse in aria in un ambiente con un certo grado di confinamento, la quale genera come prodotti i gas caldi, che si trovano a temperatura elevata. I gas caldi vorrebbero espandersi per seguire la legge dei gas perfetti, ma se vi è un grado di confinamento del volume in cui avviene il fenomeno, si ha un innalzamento della pressione (generalmente variabile tra i 6 e i 10 bar) che generalmente provoca il cedimento delle strutture circostanti e quindi lo scoppio e l'esplosione.

[c] L'amido è un polisaccaride, polimero costituito da catene di glucosio. Gli amidi contenuti nei prodotti di origine agricola hanno strutture diverse ed hanno contenuti differenti dei due maggiori composti: amilosio e amilopectina.

Qundi possiamo definire l'esplosione come un processo chimico esotermico, che avviene in condizioni di regime transitorio e che, quando avviene in un volume confinato, origina un improvviso e significativo aumento di pressione ([10]).

Nelle norme NFPA americane con il termine esplosione ci si riferisce agli effetti: lo scoppio, il cedimento o la rottura di un volume chiuso o di un contenitore dovuto allo sviluppo della pressione interna proveniente da una deflagrazione.

La Figura 1.2a illustra come un pezzo di legno una volta acceso brucia lentamente consumando il suo calore in un lungo periodo di tempo.

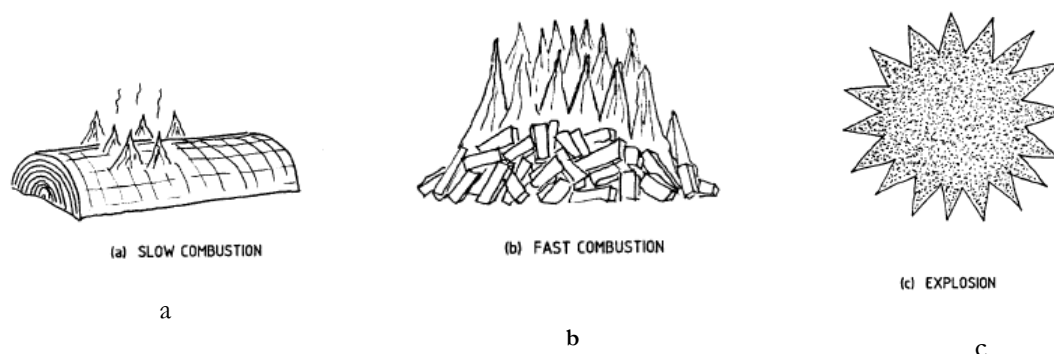
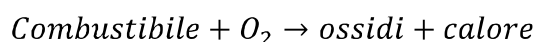



Figura 1.2 Illustrazione dell'aumento della velocità di combustione di un pezzo di legno all'aumentare del grado di suddivisione (Eckhoff, 2003).

Quando lo tagliamo in piccoli pezzi come in figura 1.2 b la rapidità con cui brucia aumenta, poiché la superficie di contatto portale tra il legno e l'aria è aumentata. Se il grado di suddivisione viene aumentato e portato fino ad ottenere particelle dell'ordine di grandezza di 0.1 mm o addirittura meno (1-100 μm intervallo più comunemente incontrato per le polveri combustibili) e le particelle sono sospese in un volume di aria sufficentemente ampio da dare ad ogni particella abbastanza spazio per una combustione libera la velocità di combustione è molto veloce e l'energia richiesta per l'accensione molto piccola. In generale la nube di polvere è più facile da accendere e brucia violentemente tanto più quanto le particelle sono al di sotto di una precisa dimensione che dipende dal tipo di materiale. Generalmente la reazione chimica coinvolta in una esplosione di polvere è la seguente

$$Combustibile + O_2 \rightarrow ossidi + calore$$

I materiali che hanno una **composizione chimica con ossidi stabili** non causano esplosioni di polvere.

I materiali che possono causare esplosioni di polvere includono:

- **materiali naturali organici (sostanze alimentari, legno)**
- materiali organici sintetici (polimeri,resine)
- carbone e torba
- i metalli

Le tabelle seguenti forniscono una scala indicativa della pericolosità di un'esplosione in base alla sovrapressione raggiunta:

Sovrapressione in aria (kPa)	Danno
0,2 - 6	Rottura di vetri
1	Rottura di vetri (valore tipico)
3 - 15	Danni a edifici
15 - 20	Distruzione di muri e mattoni, strutture c.a.
20 - 30	Cedimento di serbatoi per combustibili liquidi
30 - 70	Distruzione totale di edifici
35	Rottura di timpani
35	Abbattimento di pali di legno
50 - 60	Rovesciamento di vagoni ferroviari carichi
70	Danni letali ai polmoni

Tabella 1-1 Danni provocati dall'esplosione **-** Fonte: Rischi di incidente rilevante, Cap. VII (Stabilità Sistemi chimici), Dipartimento dei Vigili del Fuoco – Comando Provinciale di Bergamo

Structural element	Failure	Approximate incident blast overpressure (lb/inch^2)
Glass windows, large and small	Shattering usually; occasional frame failure	0.5–1
Corrugated asbestos siding	Shattering	1–2
Corrugated steel or aluminum panelling	Connection failure followed by bucking	1–2
Wood siding panels, standard house construction	Usually failure occurs at the main connections allowing a whole panel to be blown in	1–2
Concrete or cinder block wall panels 8 m or 12 m thick (not reinforced)	Shattering of the wall	2–3
Self-framing steel panel building	Collapse	3–4
Oil storage tanks	Rupture	3–4
Wooden utility poles	Snapping failure	5
Loaded rail cars	Overturning	7
Brick wall panel 8 inch or 12 inch thick (not reinforced)	Shearing and flexure failures	7–8

Tabella 1-2 Condizioni del cedimento di elementi strutturali

Possiamo classificare la pericolosità delle polveri di origine agricola in base ad un indice che tiene conto della severità dell'esplosione e della sensibilità all'accensione:

Tipo di polvere	**Gravità dell'esplosione**
Amido di grano	Molto Grave
Amido di mais	Molto Grave
Polvere di mais	Grave
Polvere mista	Grave
Farina di soia	Grave
Farina di grano	Grave

1.3 CONDIZIONI PER UN'ESPLOSIONE DI POLVERE

Un'esplosione di polvere combustibile avviene se si verificano contemporaneamente le seguenti cinque condizioni (condizioni necessarie e sufficienti) (NFPA 61-2008):

(1) La polvere deve essere combustibile: in pratica vuol dire che il materiale ha la capacità di bruciare in aria, è cioè un solido capace di subire il processo d'ossidazione e quindi la sua composizione chimica non presenta ossidi stabili;

(2) Le particelle di polvere devono essere disperse in aria: devono cioè formare una nube di polvere e devono avere una concentrazione pari o superiore al limite inferiore di esplosività;

(3) La nube di polvere deve essere contenuta entro un volume confinato (un'attrezzatura industriale o un volume confinato di un impianto industriale);

(4) Una sorgente di innesco efficace deve essere presente: l'energia deve essere sufficiente a portare le particelle di polvere alla temperatura di autoaccensione[d] del materiale di cui esse sono composte.

(5) Deve essere presente un comburente, solitamente ossigeno. Si è visto che la concentrazione minima di ossigeno che non alimenta l'esplosione è intorno al 7%.

Nella figura sottostante è rappresentato il cosiddetto pentagono dell'esplosione, dove ogni lato rappresenta uno degli elementi suddetti. Solo se tutti i lati sono presenti il pentagono si chiude ed avviene l'esplosione:

Figura 1.3 –Pentagono dell'esplosione (estensione del triangolo del fuoco).

[d] Per un corpo solido la temperatura di autoaccensione è definita come quella temperatura alla quale la sua superficie inizia a decomporsi (pirolisi) ed emette dei vapori infiammabili.

L’esplosione di una polvere combustibile organica è caratterizzata da:

(1) Rapido aumento di temperatura: il calore è prodotto dalla reazione di combustione ad una velocità molto più elevata di quella con cui viene dissipato; Lee (1987) ha studiato l'importanza del trasferimento di calore per conduzione, convezione e irraggiamento durante un'esplosione e sembra che i primi due sono i meccanismi più incidenti nel fenomeno dell'esplosione delle polveri combustibili di origine organica naturale.
(2) Propagazione di un’onda di pressione (compressione adiabatica);
(3) Rapida e localizzata liberazione di energia;
(4) Pirolisi delle particelle di polvere;

Quando una nube di polvere combustibile ed aria si incendia, l’onda di pressione che si instaura a regime permanente può propagarsi attraverso la nube stessa e nell’ambiente circostante in due modalità diverse:

(1) **Deflagrazione**: La fiamma si propaga ad una velocità subsonica rispetto alla nube di polvere ancora incombusta; è il tipo di propagazione più comune e le velocità della fiamma rispetto ad un osservatore fisso sono dell’ordine da 1 fino a 1000 m s^{-1}. La pressione di esplosione può raggiungere valori da 1 a 10 [bar g] [e]
(2) **Detonazione**: un’onda di detonazione si verifica quando la zona di combustione (l’onda) si propaga ad una velocità supersonica rispetto alla velocità del suono misurata nella nube di polvere non ancora bruciata che si trova davanti al fronte di fiamma. In questo caso l’onda d’urto e la zona di combustione sono accoppiati. Tipiche velocità dell'onda di detonazione sono 1500-2000 m s^{-1} e le pressioni di picco sono di 15-20 bar (Figura 1.4).

La modalità con cui la fiamma si propaga, inizialmente dal punto di innesco con una bassa velocità, dipende anche dalla geometria del volume: infatti in un volume sferico, con un fattore di forma $L/D = 1$, la fiamma non accelera e la pressione crescerà lentamente. Nei contenitori più grandi l’incremento di pressione può avvenire anche in 10 s ($\Delta p/\Delta t \approx 1$). Invece nei contenitori che hanno un’elevata rapporto di forma (L/D >> 1), come per esempio i condotti per il trasporto delle polveri, si può arrivare a velocità della zona di combustione fino a 2000 m/s e la pressione può raggiungere 20 atmosfere in meno di 0.1 s ($\Delta p/\Delta t \approx 200$).

[e] Il simbolo g indica il termine anglosassone *gauge* e sta ad indicare che il valore della pressione è relativo alla pressione dell’ambiente circostante, cioè è una sovrapressione.

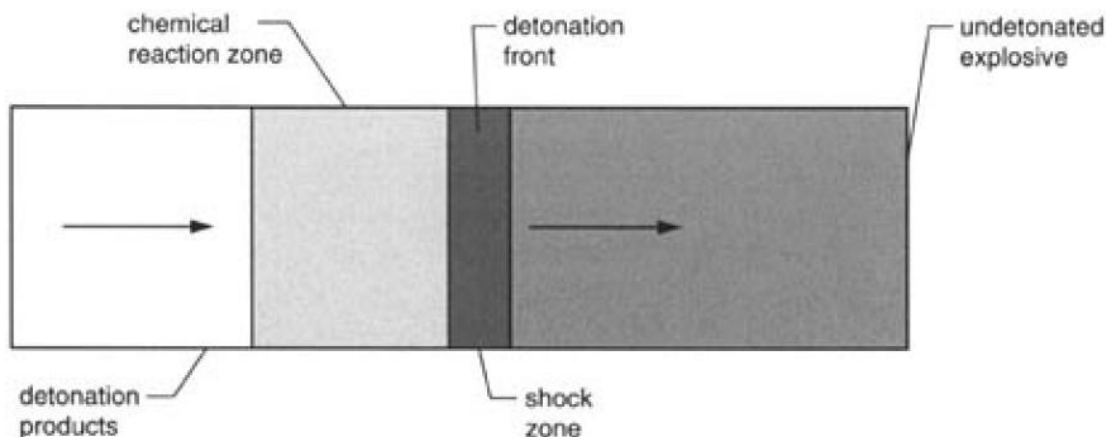



Figura 1.4 – Schema di detonazione di una miscela esplosiva: in una detonazione, i prodotti della combustione si muovono verso i prodotti che non hanno ancora reagito. Invece una deflagrazione i prodotti della combustione si muovono in direzione opposta a quelli che ancora non hanno reagito. L'onda d'urto si muove a velocità, pressioni e temperature molto alte. Immediatamente dietro vi è una zona di reazione: la pressione può superare centinaia di migliaia di atmosfere e la temperatura i 3000°.

Siccome la combustione di una polvere organica naturale, come si vedrà più avanti, avviene in fase gassosa, in prima approssimazione possiamo usare la formula dei gas perfetti per descrivere un'esplosione:

$$pV = nRT = \frac{n}{M} RT$$

Dove:

p,V,T Variabili di stato (pressione assoluta, Volume del contenitore e Temperatura)
R Costante universale dei gas perfetti
n Numero delle moli
M Peso molecolare del gas

In prima approssimazione, possiamo considerare la reazione di combustione una rapida trasformazione adiabatica a volume costante, senza variazione del numero di moli. In queste ipotesi possiamo scrivere:

$$\frac{p_{\max}}{p_0} = \frac{T_b}{T_0}$$

Dove:

p_0, T_0 Condizioni iniziali della trasformazione adiabatica ed isocora
$p_{\max}, T_b$ Condizioni finali della trasformazione adiabatica ed isocora

Questa formula può servire per avere un ordine di grandezza della pressione massima raggiunta da un'esplosione. Questo valore sarà più esatto quanto più la reazione è rapida e quanto più è trascurabile la variazione del numero di moli durante l'esplosione.

1.4 PROVE DI LABORATORIO SULLE POLVERI

Le polveri combustibili utilizzate nel processo produttivo che possono provocare un'esplosione dovrebbero essere sottoposte a prove tali da determinare i seguenti parametri:

(1) La distribuzione statistica della dimensione delle particelle;

(2) Contenuto di umidità;

(3) Concentrazione minima per l'accensione;

(4) Energia minima richiesta per l'accensione;

(5) Incremento di pressione nell'unità di tempo massimo per varie concentrazioni;

(6) Temperatura di accensione dello strato di polvere;

(7) Pressione di esplosione massima alla concentrazione ottima;

Altre prove possono essere eseguite per determinare:

(1) La temperatura di accensione della nube di polvere;

(2) La concentrazione massima di ossigeno ammissibile per prevenire l'accensione;

(3) La resistività elettrica.

Prova con reattore sferico 20l o con reattore cubico 1m^3:

Questa prova permette di classificare polvere in una classe di esplosività (k_{st} indice di pericolosità delle polveri). Essa viene eseguita in un reattore standard (recipiente chiuso con resistenza alla pressione generata al suo interno) con un volume 1 m^3 e con due inneschi di tipo chimico con l'energia totale di 10 kJ oppure in una sfera di 20 l con due inneschi di energia totale pari a 2 kJ seguendo delle procedure standard (ISO 6184/1 oppure ASTM E 1226).

La prova si svolge disperdendo omogeneamente il campione di polvere all'interno del recipiente. Trascorso un preciso intervallo di tempo, viene attivato l'innesco e viene registrato l'andamento nel tempo della sovrapressione dell'esplosione (Figura 1.5). Poi vengono ripetute altre prove con concentrazioni diverse fino a quando vengono ottenuti i valori massimi per la sovrapressione di esplosione p_{MAX} [bar g] e per la massima variazione di pressione nell'unità di tempo $\left[\frac{dp}{dt}\right]_{max}$ [bar s^{-1}].

Il tempo dell'innesco (triggering) è stabilito dal tipo di norma tecnica che si sta seguendo. Per esempio nella norma tecnica ISO 6184 Part 1 è prescritto un ritardo tra l'innesco e l'inizio della dispersione della polvere combustibile all'interno del contenitore di 0,6 s (vedi Paragrafo 3.6)

La valutazione dell'esplosività è basata sui valori di pressione misurati. Se non viene rilevata una sovrapressione maggiore di 0,3 bar una polvere non è considerata esplosiva, al contrario viene classificata esplosiva.

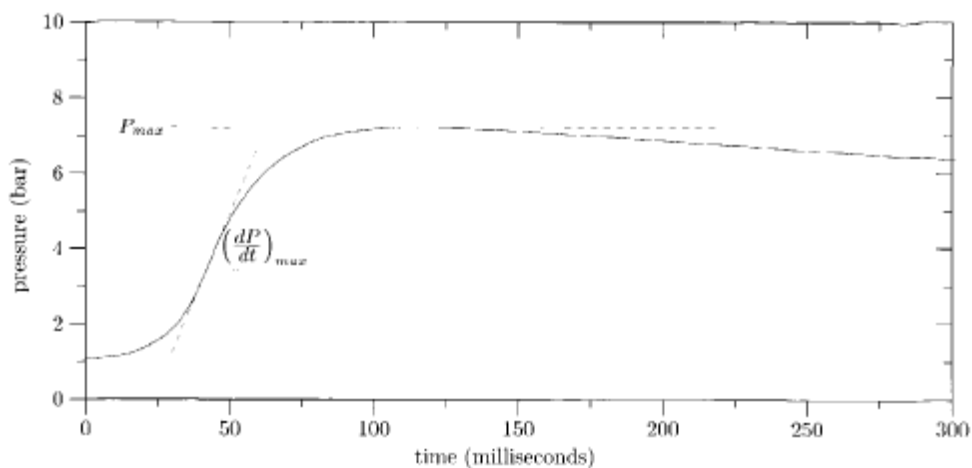



Figura 1.5 Curva dell'esplosione (pressure time history) di una nubi di amido dimais in concentrazione di 500 g m^{-3} nel reattore sferico di 20 l.

La $\mathbf{p_{MAX}}$ è definita dalla differenza tra la pressione all'istante dell'accensione e la pressione massima raggiunta durante l'esplosione. Durante la prova effettuata nel reattore sferico di 20 l[f] o in quello di 1 m³ si ripete la prova in un vasto intervallo di concentrazione ottenendo una serie di valori di pressioni massime. La p_{MAX} è il maggiore di questi valori.

[f] È un contenitore sferico d'acciaio il mantello è controllato termicamente con un ossigeno dall'acqua. La polvere viene persa nella sfera attraverso un contenitore in pressione ed un uccello che può essere ad anello o di tipo "rebound". Un'unità di controllo chissà tanti e controlla i segnali per condurre correttamente il test.

1.5 LA LEGGE CUBICA

La legge cubica (Bartknecht, 1981) è una legge di scala utilizzata per convertire i valori ottenuti nella prova di laboratorio in un reattore di prova in condizioni standard sull'esplosività della polvere combustibile in un numero indipendente dal volume del contenitore di prova in cui avviene l'esplosione e quindi applicabile ad un impianto industriale:

$$\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX} \bullet V^{1/3} = k_{st} \qquad \left[bar \cdot \frac{m}{s}\right]$$

Dove:

V	Volume del recipiente di prova[g] (reattore di prova)
$\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX}$	Massima velocità di aumento della sovrapressione
k_{st}	Indice o costante di esplosività della polvere nelle particolari condizioni di prova (turbolenza iniziale) (st=staub = polvere in tedesco)

In base ai risultati del test ed al tipo della fonte d'innesco la polvere viene classificata:

k_{st} **[bar m s^{-1}] (Sorgente d'innesco 10 J)**	k_{st} **[bar m s^{-1}] (Sorgente d'innesco 10 kJ)**	**Classe di esplosività**	**Misure di sicurezza** ↓
$k_{st} \leq 100$	$k_{st} \leq 200$	**St 1**	
$100 \leq k_{st} \leq 200$	$200 \leq k_{st} \leq 300$	**St 2**	
$k_{st} > 200$	$k_{st} > 300$	**St 3**	

Tabella 1-3 – Fonte: NFPA 68-2007 e Bartknecht, 1981: campioni di polvere con diametro equivalente minore od uguale a 40 μm, innesco: scariche capacitive (10 J) o filamenti incandescenti (10 kJ).

La validità di questa legge è stata discussa R. Eckhoff e A.E. Dahoe, ed è stato dimostrato che essa non è più valida quando lo spessore della fiamma[h] diventa confrontabile con la dimensione caratteristica del recipiente dove avviene l'esplosione e se la velocità di combustione è

[g] La legge cubica è applicata in un contenitore senza superficie di sfogo.

[h] Lo spessore della fiamma di una nube i polvere ed aria in regime laminare è dell'ordine della frazione del mm, mentre in regime turbolento è di qualche mm di spessore. Per maggiori approfondimenti vedere CAPITOLO 3.

paragonabile. Inoltre essa non tiene conto della turbolenza della nube di polvere ed aria, causa della variazione di p_{MAX} e $\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX}$.

Una formula analoga è valida anche per i gas, ma è importante osservare che, poichè lo spessore della fiamma della nube di polvere combustibile ed aria è mediamente superiore di quello di una miscela di gas ed aria, la legge cubica ha una validità più ristretta: quindi nella sua applicazione occorre maggiore attenzione. Inoltre durante una combustione turbolenta di una polvere combustibile dispersa in aria, la dimensione della zona di reazione è di un ordine di grandezza maggiore di quella dei gas premiscelati (Lee, 1987). In ogni caso essa è valida per apparecchiature di prova con volume pari ad almeno 20 litri e per contenitori aventi un rapporto di forma (L/D) non superiore a 5.

Nonostante queste limitazioni, le norme tecniche ISO , EN, ASTM, NFPA e VDI approvano l'uso e la validità della legge cubica.

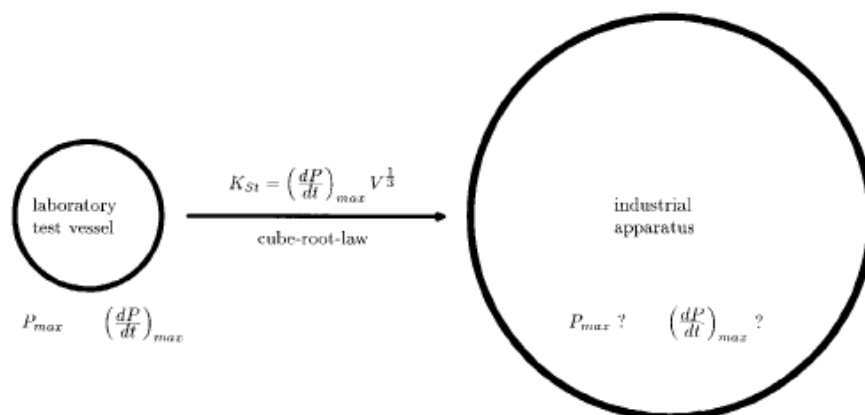



Figura 1.6 – Legge di scala di un'esplosione: non si può affermare senza riserve la trasposizione alle dimensioni delle attrezzature industriali (fonte: Dahoe, A. E., Dust Explosions: a Study of Flame Propagation, Technische Universiteit Delft, 2000)

La legge è anche utilizzata per calcolare l'indice di esplosività k_{st} delle polveri, parametro che poi si utilizza anche nelle formule per il dimensionamento degli sfoghi delle pressioni durante le esplosioni.

Guardando l'espressione della legge cubica, possiamo notare che al variare del volume del contenitore, varia la variazione di pressione nell'unità di tempo, ma la p_{MAX} rimane la stessa. Questa tesi non è valida in condizioni di flusso turbolento, come si può vedere dalla Tabella 1-4).

Nel reattore di prova di 1 m^3 e nelle condizioni previste dalla norma seguita, il valore di k_{st} è numericamente uguale al valore della velocità di crescita della pressione massima misurato.

Il valore dell'indice di esplosività k_{st} è diverso a seconda della turbolenza nella nube di polvere combustibile ed aria, come si può notare dalla Tabella 1-4 che riassume, per una polvere molto utilizzata negli esperimenti, l'amido di mais, i diversi valori ottenuti nel corso degli anni dai diversi ricercatori. Comunque l'unico valore da utilizzare nelle formule per il dimensionamento degli sfoghi è quello ottenuto con la prova standard, accettata dalla norma tecnica che si sta seguendo per il dimensionamento.

Investigator	$(dP/dt)_{max}$ (bar/s)	Volume V of apparatus (m³)	K_{St} (bar·m/s)
Bartknecht (1978)	680	0.0012	73
Nagy and Verakis (1983)	612	0.0012	66
Eckhoff et al. (1987)*	220	0.0012	23
Nagy and Verakis (1983)	413	0.009	86
Aldis, Lee, and Lai (1983)	320	0.020	87
Eckhoff et al. (1987)*	365	0.020	100
Yi Kang Pu (1988)	10–20	0.026	3–6
Yi Kang Pu (1988)	60–80	0.026	20–25
Nagy and Verakis (1983)	272	0.028	83
Bond, Knystautus, and Lee (1986)	50	0.33	34
Kauffman et al. (1984a)	72	0.95	71
Kauffman et al. (1984a)	20	0.95	20
Nagy and Verakis (1983)	136	3.12	200
Nagy and Verakis (1983)	110	6.7	209
Nagy and Verakis (1983)	55	13.4	131

*Arithmetic mean values, 11% moisture in starch.
Source: Extended and modified version of table from Pu, 1988.

Tabella 1-4 Valori dell'indice di esplosività per la polvere di amido di mais calcolati, attraverso la legge cubica, da vari ricercatori in contenitori diversi e con condizioni di turbolenza diversa.

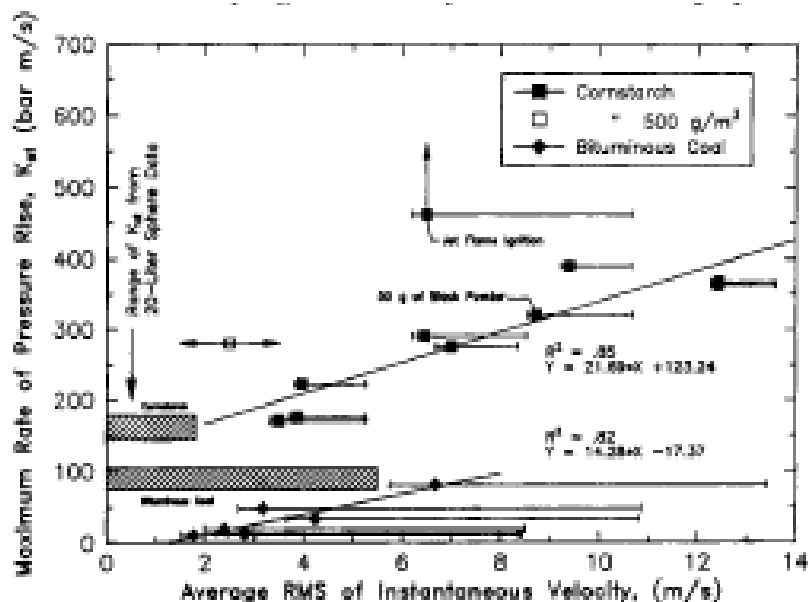



Figura 1.7 – Dipendenza dell'indice di esplosività k_{st} dall'internsità di turbolenza u'_{RMS} (Tamanini, 1990).

1.6 PROPRIETÀ FISICHE E CHIMICHE DELLE POLVERI E DELLE NUBI DI POLVERE

Una polvere combustibile è una sostanza avente una composizione chimica in grado di reagire esotermicamente con l'aria . Tuttavia il pericolo di esplosione riguarda, in base agli incidenti accaduti, soltanto le polveri combustibili aventi un **calore di combustione superiore a 4,5** MJ/kg . Di solito le polveri con un potere di combustione fino ai 2,3 MJ/kg non presentano pericolo d'esplosione. Nonostante ciò, il pericolo di esplosione può in ogni caso avvenire quando c'è un processo produttivo che viene eseguito ad alta temperatura, quando viene utilizzata una sostanza ossidante oppure vi è un'alta concentrazione d'ossigeno (fonte: Nagy, J. and Verakis, H. C., Development and control of dust explosions M. Dekker, New York, NY, USA, United States, 1983).

Il calore di combustione delle polveri di cereali varia **tra 12 e 20** MJ/kg .

Per confronto il calore di combustione di un idrocarburo paraffinico, C_nH_{2n+2}, propano, butano, n-esano, n-eptano..) è di circa **45** MJ/kg .

Substance	Oxidation product (s)	KJ/mole O_2
Ca	CaO	1270
Mg	MgO	1240
Al	Al_2O_3	1100
Si	SiO_2	830
Cr	Cr_2O_3	750
Zn	ZnO	700
Fe	Fe_2O_3	530
Cu	CuO	300
Sucrose	CO_2 and H_2O	470
Starch	CO_2 and H_2O	470
Polyethylene	CO_2 and H_2O	390
Carbon	CO_2	400
Coal	CO_2 and H_2O	400
Sulphur	SO_2	300

Tabella 1-5 Calore di combustione di varie sostanze per mole di Ossigeno consumata: possiamo notare le sostanze organiche naturali: saccarosio (sucrose) ed amido (starch).

Le concentrazioni di polvere combustibile dispersa in aria che costituiscono pericolo di esplosione sono di gran lunga oltre il limite di tollerabilità dei lavoratori a contatto con essa, ai fini della salute sul luogo di lavoro. Tuttavia questi limiti sono raggiunti e superati frequentemente all'interno delle attrezzature utilizzate. Quindi un'esplosione all'interno di esse ha probabilità di avvenire e di solito gli effetti dell'esplosione di questo tipo (esplosione primaria)

non causano gravi danni perché gli sfoghi di pressione delle attrezzature (che cedono a pressioni basse) permettono che il processo di combustione avvenga nel compartimento che contiene l'attrezzatura che ha un volume molto maggiore e la pressione non cresce mai fino a raggiungere livelli pericolosi.

La pericolosità quindi delle esplosioni di polveri è rappresentata soprattutto dalle esplosioni secondarie: quando l'esplosione primaria fuoriuscita dall'attrezzatura, attraverso sfoghi di pressione, si propaga all'interno del compartimento, la regione di combustione, a causa del moto dell'aria e delle vibrazioni indotte da essa, si trascina gli strati di polvere se il compartimento non è mantenuto pulito oppure provoca la rottura di recipienti (per esempio sacchi) contenenti altra polvere. In questo modo l'intera atmosfera del compartimento diventa estremamente infiammabile e gli effetti di quest'esplosione sono i più dannosi.

Le esplosioni che hanno inizio all'interno di un'attrezzatura come un mulino, un miscelatore, un essicatore, un filtro o un nastro trasportatore a causa di una sorgente di accensione sono chiamate **esplosioni primarie**. Invece le esplosioni secondarie sono dovute al trascinamento di strati di polvere dall'onda di esplosione dell'esplosione primaria. È interessante notare che la densità di uno strato di polvere depositato su una superficie orizzontale è circa due ordini di grandezza maggiore del limite superiore di esplosività:

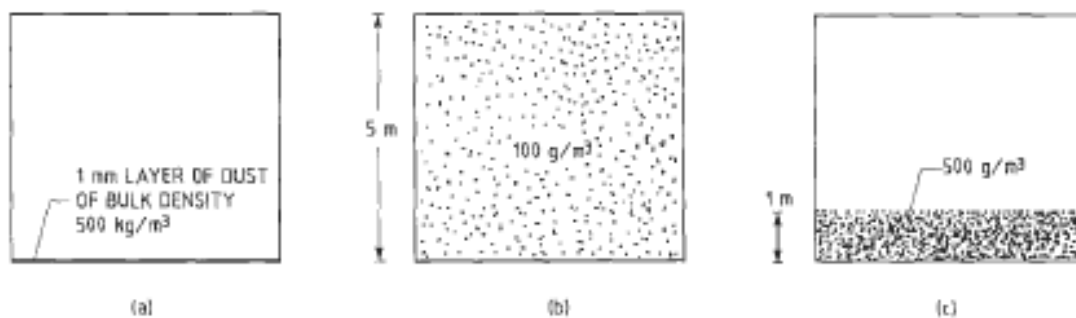



Figura 1.8 Persino uno strato di polvere dello spessore di 1 mm e densità 500 gm^{-3}, quando viene disperso in un volume di 5 m^3 genera una nube con densità 100 gm^3: il volume diventa pericoloso.

1.6.1 DIMENSIONE E DISTRIBUZIONE STATISTICA DELLE PARTICELLE

Le polveri organiche naturali di cui sono composti i prodotti agroalimentari o che vengono generate nei processi produttivi sono composte da umidità, amido, proteine, grassi, e sostanze incombustibili. Gli elementi chimici sono gli stessi di tutte le sostanze organiche derivate dalle piante (carbonio, idrogeno, azoto e ossigeno) più tracce di diversi minerali. Le polveri di origine agricola sono tra il 60 e l' 80 % combustibili (la rimanente parte è umidità e sostanze incombustibili) e hanno diametri medi **da 17 a 120 μm**. (Fonte: Report of Committee on evaluation of industrial hazards. (1982). "Prevention of Grain Elevator and Mill Explosions." National Academy Press, Washington).

Possiamo classificare le polveri, oggetto del nostro interesse, come particelle aventi una dimensione caratteristica compresa in una certo intervallo compreso tra 1 e 10^3 μm, mentre per dimensioni superiori od inferiori le particelle sono classificate diversamente, secondo lo schema sottostante:

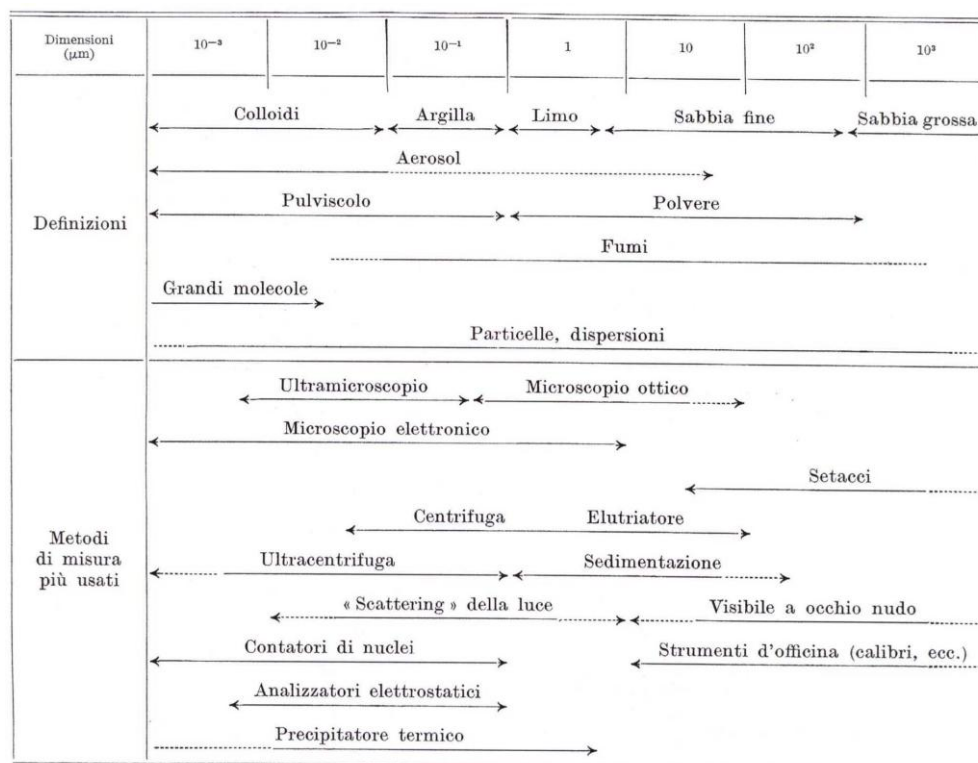



Figura 1.9– Dimensioni caratteristiche (diametri equivalenti) delle polveri in confronto con quelle di altre particelle con indicazione dei metodi di misura. I valori limite per le polveri sono $10^{-6} \div 10^{-4}$ m. (Fonte: Dizionario d'Ingegneria, a cura di F.Perrucca, UTET, 1968).

Le norme NFPA definiscono polveri agricole tutti i materiali agricoli solidi finimenti divisi aventi un diametro di 420 micron o minore misurato con un setaccio di prova U.S. no. 40. Infatti le polveri con dimensione superiore presentano una tendenza all'esplosione molto bassa.

Nella norma tecnica CEI EN 50281-3, utilizzata per classificare le aree con il pericolo di esplosione delle polveri, in applicazione alle Direttive ATEX, la definizione di polvere è più operativa: le polveri sono piccole particelle solide nell'atmosfera, comprendente anche fibre e residui volatili di filatura, che si depositano per il loro peso, ma che possono rimanere sospese per un certo periodo di tempo.

Le dimensioni della farina di cereali sono riportate nelle seguenti tabelle:

Name	Solid density ρ_s (g/cm³)	Bulk density ρ_b (g/cm³)
Wheat flour	1.45–1.49	0.4–0.75
Rye flour	1.45	0.45–0.7
Corn flour	1.54	0.5–0.7
Corn starch	1.62	0.55
Polished rice	1.37–1.39	0.7–0.8

Source: Modified from Ref. 5.

Tabella 1-6 Dimensioni caratteristiche di alcune polveri di cereali (Kaletunc, H., and Breslauer, K. (2003). Characterization of flour and cereals, Marcel Dekker, New York).

Particle size range (μm)	Use	Particle size range (μm)	Use
1–150	Pan bread	0–150	Soups and gravies
1–150	Hearth bread	0–125	Crackers
1–150	Variety bread	0–125	Cookies
1–150	Soft roll	0–125	Layer cakes
1–150	Sweet goods	20–60	Form cakes
1–150	Home baking	0–90	Biscuits

Tabella 1-7 Dimensioni caratteristiche della farina di grano per i diversi usi (Kaletunc, H., and Breslauer, K. (2003). Characterization of flour and cereals, Marcel Dekker, New York).

1.6.2 AREA SUPERFICIALE SPECIFICA DI ESPOSIZIONE

L'area superficiale specifica è un altro modo per descrivere il grado di suddivisione di un corpo solido ed è espresso in area per unità di volume $\left[\frac{1}{m}\right]$ oppure area per unità di peso $\left[\frac{m^2}{g}\right]$.

Per capire l'mportanza dell'area superficiale e il suo aumento iperbolico al diminuire della dimensione delle particelle, possiamo immaginare di avere un corpo solido di forma cubica di lato l e di sudduvederlo in otto cubi uguali di lato $x = l/2$:

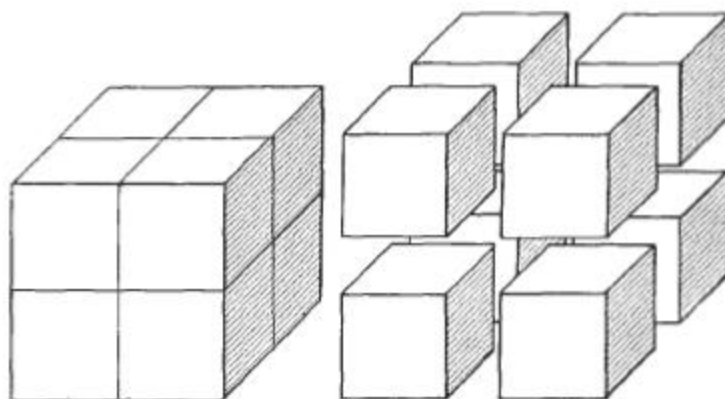



Figura 1.10 – Esempio per mostrare l'aumento dell'area superficiale dato dalla suddivisione di un solido. In questo caso l'area superficiale aumenta di un fattore 2.

Gli otto cubetti suddivisi avranno un'aria superficiale espressa dalla relazione:

$$S_{\text{sup}} = \frac{6x^2}{x^3} = \frac{6}{x}$$

Quindi, l'area specifica superficiale è raddoppiata.

Un fenomeno fisico che assume importanza all'aumentare dell'aria superficiale specifica è l'incidenza delle forze interparticellari rispetto alle forze di gravità; quando questo accade, le particelle di una nube in aria, anche in base ad altri parametri, quali l'umidità, si presentano in mucchi ed agglomerati (vedi Paragrafo 1.6.3).

Il processo di esplosione diventa più violento al diminuire della dimensione delle particelle e quindi all'aumentare dell'area specifica superficiale:

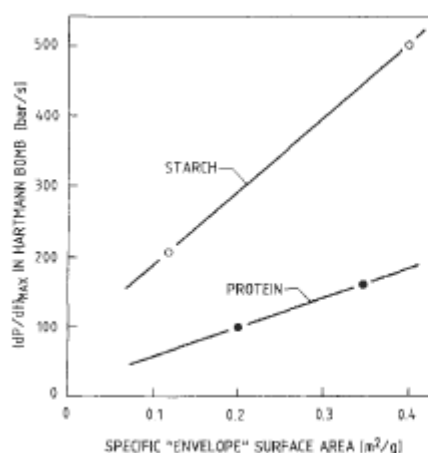



Figura 1.11 – Dipendenza della violenza dll'esplosione dalla composizione chimica della polvere (amido e proteine) e dall'area specifica. La prova è stat eseguita nel contenitore di Hartmann da 1,2 l.

Questo aumento della velocità di crescita della pressione di esplosione raggiunge poi un valore limite: infatti vi è una dimensione delle particelle al di sotto della quale la velocità di combustione cessa ad aumentare. Per esempio per i materiali organici per i quali la combustione vera e propria è preceduta dalla pirolisi (o devolatizzazione), questa dimensione critica dipende dal rapporto tra le costanti di tempo di questi tre processi a catena: devolatizzazione, miscelazione in fase gassosa e combustione in fase gassosa. Per i composti naturali organici questa dimensione è all'incirca pari a **10 μm**.

1.6.3 AGGLOMERAZIONE

Un altro fattore che condiziona l'esplosività della nube di polvere è il grado di dispersione e di agglomerazione della nube: Infatti l'agglomerazione interviene su un parametro che influenza la violenza dell'esplosione e cioè l'area superficiale delle particelle di polvere esposta all'ossigeno:

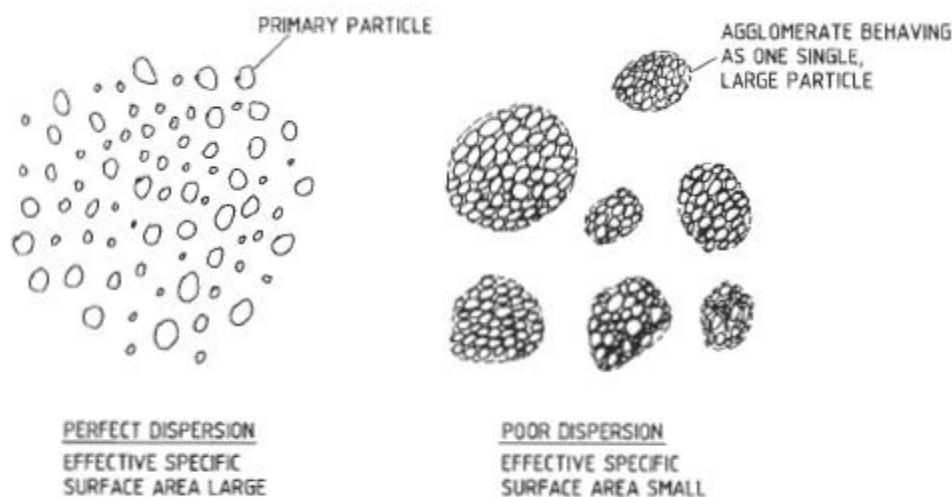



Figura 1.12 – Rappresentazione di una nube dispersa in modo ideale di una con agglomerazione delle particelle di polvere. Gli agglomerati di polvere si comportano come una particella di dimensioni molto maggiori.

1.6.4 DISPERSIBILITÀ DELLA POLVERE

La dispersibilità di una polvere è la tendenza di uno strato di polvere a formare una nube. La dispersibilità degli strati di polvere è una proprietà di rilievo in relazione al pericolo di esplosioni secondarie. Essa viene studiata in laboratorio misurando due valori: valore minimo di dispersione (lift-off treshold), cioè la velocità del flusso d'aria capace di trascinare lo strato di polvere nel flusso e la velocità di sedimentazione (settling velocity), cioè la rapidità con cui la polvere tende a formare strati su superfici orizzontali.

La formazione di una nube di polvere ed aria da uno deposito di polvere implica di considerare due tipologie di forze ben distinte che agiscono: le forze all'interno dello strato di polvere che giace sulla superficie, e le forze che un'eventuale flusso deve possedere per vincere queste forze e trascinare lo strato nella nube. R. Eckhoff ha definito la dispersibilità come l'inverso della quantità minima di lavoro necessario a spezzare i legami che agiscono all'interno dell'unità di massa di polvere depositata (kg/J).

La distribuzione delle dimensioni delle particelle dello strato di polvere hanno una grande influenza sul lavoro richiesto per vincere i legami. Per esempio le polveri che consistono di piccole particelle sono comprimibili: il motivo è che le forze di coesione sono più forti della forza di gravità tra le particelle e quindi si formano delle strutture di cumuli di particelle che fanno aumentare il compattamento. Quindi le particelle con una dimensione molto piccola hanno una scarsa dispersibilità.

1.6.5 CONTENUTO D'UMIDITÀ

L'acqua contenuta nella polvere provoca due fenomeni che attenuano gli effetti dell'esplosione:

(1) In caso di esplosione, sottrae molto calore di vaporizzazione alla reazione di combustione;

(2) Favorisce la coesione tra le particelle di polvere e diminuisce quindi la superficie specifica [m^2/l] esposta all'aria(diminuzione della superficie specifica e per umidità maggiore del 15% si ha una notevole diminuzione di MRPR).

Inoltre:

(1) Polveri con percentuale di umidità oltre il 15% hanno valori molto bassi della massima velocità di crescita della sovrapressione $\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX}$;

(2) l'umidità fa aumentare la minima concentrazione di esplosività;

(3) l'umidità fa aumentare la minima energia e la minima temperatura d'accensione;

(4) l'umidità fa diminuire leggermente anche p_{MAX}.

Per i suoi effetti "benefici" il controllo dell'umidità della polvere è un parametro che può essere utilizzato come misura di prevenzione o protezione dall'esplosione.

1.6.6 SORGENTI D'ACCENSIONE

Una sorgente di energia è efficace quando è in grado di accendere una nube di polvere combustibile ed aria e di far propagare in modo autonomo una fiamma all'interno della nube stessa. Questa possibile e la sorgente di accensione ha un valore sufficiente a raggiungere la temperatura di autoaccensione della sostanza chimica di cui è composta la polvere.

Negli incidenti di esplosioni che si sono verificati, le sorgenti di accensione più comuni sono:

- ✓ Fenomeno della combustione covante in uno strato di polvere o cumuli di polvere che raggiungono alte temperature e che si incendiano;
- ✓ Fiamme non controllate, per esempio di lavori a caldo;
- ✓ Punti caldi su superfici per attrito meccanico (per esempio cuscinetti);
- ✓ Calore dissipato per attrito o in urti meccanici;
- ✓ Cariche elettrostatiche e archi elettrici (generate quando una polvere viene trasportata in un condotto, quando cade in un recipiente o quando scivola a contatto con una superficie);
- ✓ Fenomeni di compressione adiabatica elevati e veloci
- ✓ Materiali incandescenti

I parametri che caratterizzano l'accensione di una polvere combustibile organica sono:

(1) La minima energia di accensione (MIE) di una nube e di uno strato;
(2) La minima temperatura di accensione (MIT).

Alcune sorgenti di accensione sono facilmente rilevabili (ad es. fiamme, materiali incandescenti, saldatura e taglio) e per esse l'attuazione di procedure di divieto e intervento degli operatori ne riduce il potenziale pericolo. Per altre tipologie invece il principio di pericolosità può non essere percepibile (ad es. elettricità statica, scintille, dissipazione di calore per attrito e urti, superfici calde).

1.6.7 CONCENTRAZIONE

Le esplosioni di polveri di origine agricola, contrariamente alle esplosioni di gas, hanno una risposta quasi costante in termini di pressione massima e di velocità di crescita della pressione in funzione della concentrazione: ad esempio per l'amido di mais nell'intervallo tra i 150 [g m^{-3}] e all'incirca 10 volte la composizione stechiometrica, 1500 [g m^{-3}], la velocità di crescita della pressione in un volume confinato approssimativamente indipendente dalla concentrazione della nube di polvere. In questo caso, un'esplosione della nube di polvere ed aria all'interno del contenitore, privo di sfoghi di pressione, provoca un aumento della pressione variabile tra 6 e 10 atm. Allora, una volta che un qualsiasi volume confinato contiene **la quantità minima** di polvere combustibile capace di sostenere l'esplosione, in quel volume vi è il pericolo di esplosione; la polvere in più aumenta il pericolo soltanto di una piccola quantità ed anche una quantità molto superiore a quella minima riduce il rischio soltanto di poco.

La massima violenza dell'esplosione si verifica per concentrazioni superiori a quella stechiometrica, come rappresentato nella figura sottostante:

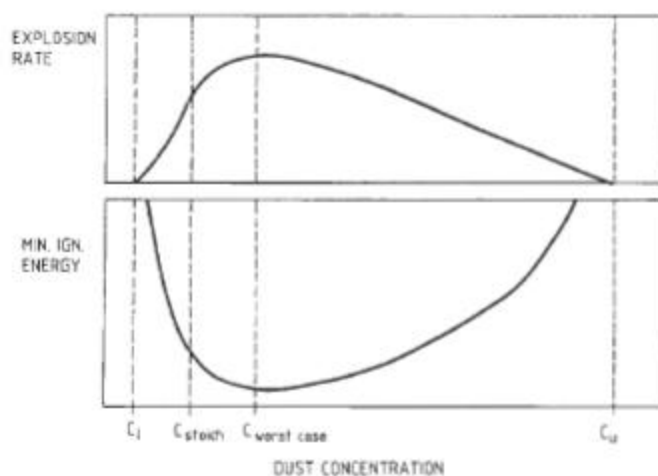



Figura 1.13 – In alto è riportato il grafico che rappresenta la velocità di crescita della pressione, che rappresenta la violenza dell'esplosione di una polvere combustibile generica in funzione della concentrazione, con l'indicazione dei limiti di esplosività. In basso invece è riportato il comportamento della polvere combustibile rispetto alla minima energia di accensione, rappresentata da una scintilla elettrica.

1.6.8 COMPOSIZIONE CHIMICA

La composizione chimica della polvere influenza sia la termodinamica che la cinetica chimica (catalisi positiva o negativa) della reazione di combustione. Per esempio il Calcio produce circa 1300 kJ per mole di Ossigeno invece il Rame produce circa 300 kJ per mole di Ossigeno. Questa differenza si ripercuote sulla pressione massima delle esplosioni. Un altro esempio dell'influenza della composizione chimica sull'esplosione è rappresentato dal diverso comportamento del PVC e del Polietilene: il Cloro nella molecola del PVC blocca la crescita di pressione quando la dimensione media delle particelle è superiore a 20 micron.

La catalisi negativa è data da composti alogenati (Cl, Fl, Br) e composti azotati. Si fa ricorso ad essi quando si protegge dal pericolo delle esplosioni di polveri con i sistemi di soffocamento dell’esplosione.

Durante la reazione chimica di combustione, c’è la variazione di molo tra reagenti e prodotti della combustione. Poiché la reazione delle polveri combustibili organiche naturali avviene in fase gassosa, possiamo utilizzare l'equazione di stato dei gas perfetti, che descrive la reciproca dipendenza delle variabili che influenzano la pressione di esplosione ed in particolare il numero di moli:

$$p = \frac{TnR}{V}$$

La Temperatura gioca un ruolo fondamentale nell’aumento della pressione d’esplosione. Invece la variazione di moli influenza in modo lieve la variazione di pressione: la massima riduzione possibile di moli durante la combustione avviene durante la reazione di polveri di metallo poichè formano ossidi di metallo condensati; invece della polvere brucia in aria e la nube a una concentrazione stechiometrica, il numero di moli si riduce di circa il 20%.

Nel caso della combustione di polveri organiche in concentrazione stechiometrica, ipotizzando che i prodotti di e della reazione siano soltanto anidride carbonica ed acqua, il numero di moli aumenta: infatti per ogni molecola di O_2 consumata si formano due molecole di H_2O. Tuttavia se la nube non ha concentrazione stechiometrica e quindi si formano CO e non tutte le particelle reagiscono, queste considerazioni diventano meno valide.

1.7 GRANDEZZE CARATTERISTICHE DELL'ESPLOSIVITÀ DELLE POLVERI COMBUSTIBILI

Quando occorre classificare la pericolosità di esplosione di una polvere combustibile e progettare le misure di prevenzione e protezione sul luogo di lavoro dove esiste tale pericolo, il primo passo è quello di conoscere i parametri caratteristici. A questo scopo gli Enti normatori nazionali e internazionali hanno sviluppato delle procedure standard per eseguire le prove, in modo da garantire la ripetitività e l'attendibilità del risultato. Di seguito sono riportate le norme ISO e ASTM che definiscono le modalità delle due prove fondamentali che si eseguono sulle polveri combustibili (per determinare la classe di pericolosità della polvere), segue poi l'elenco dettagliato delle norme UNI EN che definiscono le altre grandezze caratteristiche:

NORMA ISO	TITOLO
ISO 6184-1:1985	Explosion protection systems -- Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air

Tabella 1-8 Norma tecnica ISO che definisce gli standard di prova per la misure di esplosività delle polveri combustibili.

NORMA ASTM	TITOLO
ASTM E1226 - 05	Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts

Tabella 1-9 Norma tecnica dell'American Society for Testing of Materials che definisce gli standard di prova per la misure di esplosività delle polveri combustibili: essa fornisce un metodo eper condurre prove di laboratorio finalizzati a valutare le grandezze caratteristiche sulle proprietà di esplosività delle polveri combustibili disperse in aria.

NORME UNI EN	TITOLO
UNI EN 13673-1:2004	Determinazione della pressione massima di esplosione e della velocità massima di aumento della pressione di gas e vapori - Parte 1: Determinazione della pressione massima di esplosione
UNI EN 13673-2:2006	Determinazione della pressione massima di esplosione e della velocità massima di aumento della pressione di gas e vapori - Parte 2: Determinazione della velocità massima di aumento della pressione di esplosione
UNI EN 13821:2004	Atmosfere potenzialmente esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Determinazione dell'energia minima di accensione delle miscele polvere/aria
UNI EN 14034-1:2005	Determinazione delle caratteristiche di esplosione di nubi di polvere - Parte 1: Determinazione della pressione massima di esplosione p_{max} di nubi di polvere
UNI EN 14034-2:2006	Determinazione delle caratteristiche di esplosione di nubi di polvere - Parte 2: Determinazione della velocità massima di aumento della pressione di esplosione $(dp/dt)_{max}$ di nubi di polvere
UNI EN 14034-3:2006	Determinazione delle caratteristiche di esplosione di nubi di polvere - Parte 3: Determinazione del limite inferiore di esplosione LEL di nubi di polvere
UNI EN 14034-4:2005	Determinazione delle caratteristiche di esplosione di nubi di polvere - Parte 4: Determinazione della concentrazione limite di ossigeno LOC di nubi di polvere

Tabella 1-10 Norme tecniche UNI EN che definiscono gli standard di prova per la misure di esplosività delle polveri combustibili disperse in aria.

1.7.1 MASSIMA SOVRAPRESSIONE DI ESPLOSIONE - MEP [bar g]

La massima sovrapressione di esplosione , indicata con il simbolo P_{MAX} ed indicato in anglosassone con il termine Maximum Explosion Pressure (MEP) è un parametro legato alle proprietà termodinamiche della nube di polvere combustibile ed aria. La sua unità di misura è il ba g, dove il simbolo g (gauge) indica che il valore della pressione è relativo alla pressione dell'ambiente circostante, cioè è una sovrapressione.

Essa misura la massima pressione sviluppata rispetto alla pressione di riferimento (vedi Figura 1.15):

$$P_{max} = p_{max} - p_0$$

Dove p_{max} è la pressione massima registrata durante l'esplosione della polvere nel reattore di prova. Di solito la pressione di riferimento è la pressione atmosferica.

Il reatttore di prova è una sfera di 20 l se si segue la norma ASTM E 1226, è un contenitore cubico da 1 m^3 se si segue la norma ISO 6184 Parte 1.

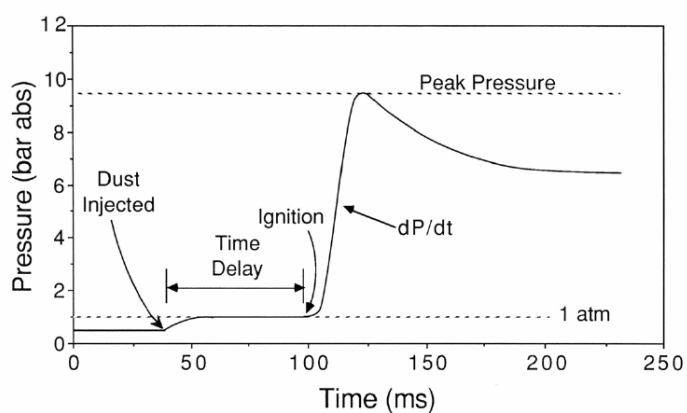



Figura 1.14 – Tipico andamento della pressione durante l'esplosione nelle reattore sferico (riportato nell figura a fianco). Un parametro importante ai fini della gravità dell'esplosione è il tempo di ritardo (time delay) tra l'inizio della dispersione della plvere e il momento dell'innesco.

La concentrazione della polvere combustibile in aria che determina questo valore massimo, durante la prova di esplosività è denominata "concentrazione ottima" [i], che a volte è notevolmente al di sopra della concentrazione stechiometrica polvere-aria.

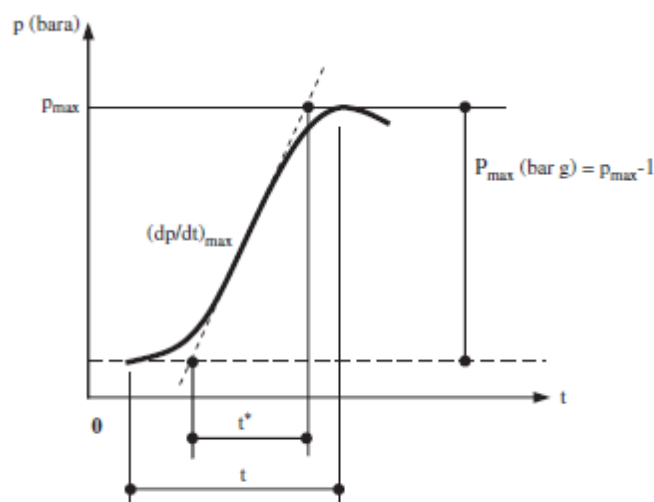



Figura 1.15 – Grafico qualitativo dell'andamento della pressione in funzione del tempo all'interno del reattore di prova. Notiamo che P_{MAX} è una sovrapressione e che la pendenza massima della curva è MRPR.

1.7.2 MASSIMA VELOCITÀ DI CRESCITA DELLA PRESSIONE – MRPR [bar s^{-1}]

La massima velocità di crescita della pressione, in anglosassone denominato: "Maximum Rate of Pressure Rise" da cui l'acronimo: MRPR, è una grandezza legata alle proprietà chimiche cinetiche dell'esplosione, cioè alla velocità con cui avviene il fenomeno della combustione;

Per ottenere questo valore, si esegue una prova di laboratorio nel reattore sferico di 20 l o nel reattore di 1m^3 tramite una trasformazione in condizioni adiabatiche a e a volume costante.

La velocità di crescita della pressione massima misurato nella reattore di prova di 1 m^3 è numericamente identico all'indice di esplosività k_{st} .

[i] Secondo la definizione riportata nella norma NFPA68-2007 Ed.: è una concentrazione per cui si verifica la reazione di combustione nel modo più rapido oppure nella quale la miscela presenta una minima energia di accensione oppure produce la massima pressione di deflagrazione.

1.7.3 MINIMA ENERGIA D'ACCENSIONE - MIE [mJ]

La minima energia di accensione di una nube di polvere dispersa in aria è definita come il valore più basso d'energia capace d'accenderla e di generare un fronte di fiamma che si propaga autonomamente, nelle specifiche condizioni di prova (Tabella 1-11).

La prova di laboratorio viene eseguita nel Tubo di Hartmann e viene misurata l'energia elettrostatica immagazzinata nei condensatori.

Questo parametro rappresenta la sensibilità all'accensione della nube d'aria e polvere.

A volte la minima energia di accensione è indicata come una coppia di valori: il valore più basso definisce la soglia al di sotto della quale sicuramente non avviene l'accensione della polvere a qualsiasi concentrazione di polvere combustibile ed aria, il valore più alto definisce il valore con il quale avviene l'accensione per qualsiasi concentrazione.

Per le polveri combustibili, l'energia capace di accendere la maggior parte della nube di polvere è dell'ordine di grandezza dei mJ. A parità di concentrazione del combustibile, è un valore maggiore di quello per i gas, come si può notare dalla figura sottostante:

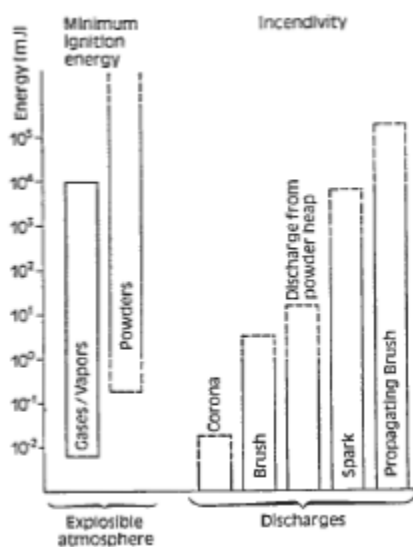



Figura 1.16 – Confronto tra gli intervalli della minima energia di accensione delle polveri e quella dei gas in aria. Invece sulla destra sono riportati i tipi di accensione di origine elettrica con indicati gli intervalli di energia di ciascun tipo. Le parti tratteggiate indicano la variabilità del limite massimo e minimo.

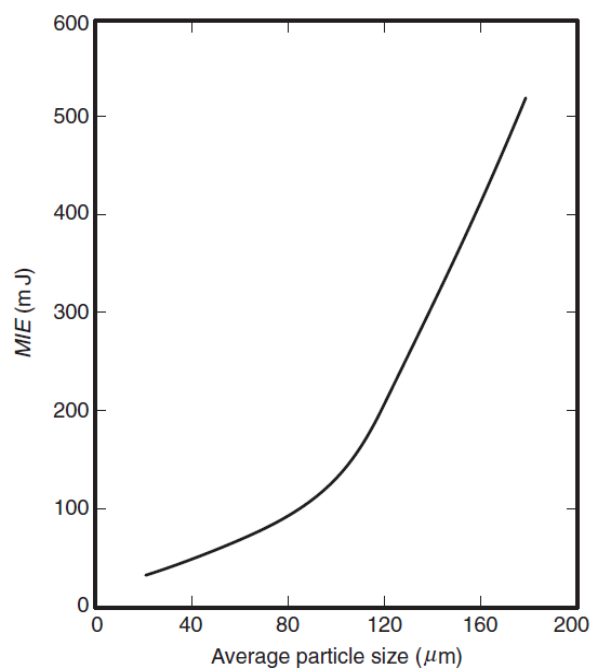



Figura 1.17 Effetto del diametro medio delle particelle di polvere sulla minima energia di accensione (MIE) di una comune polvere di origine agricola (Eckhoff, 2003)

1.7.4 MINIMA TEMPERATURA D'ACCENSIONE - MIT [°C]

La minima temperature di accensione di una nube polvere ed aria è definita come il valore più basso di temperatura di una superficie calda a contatto con essa, capace d'accenderla e di generare un fronte di fiamma che si propaga autonomamente, nelle specifiche condizioni di prova (Tabella 1-11).

La minima temperature di accensione serve a definire l'accensione di una nube di aria e polvere o di uno strato di polvere (di solito dello spessore di appena 5 mm) a contatto con una superficie calda. In Europa la prova di laboratorio segue la norma tecnica EN 50281-2-1:1999.

La minima temperatura l'accensione di una nube di polvere è determinata nel forno BAM (superficie calda orizzontale) oppure nel forno di Godbert-Greenwald (superficie calda verticale). In tutti e due gli apparati la polvere viene soffiata in un tubo contenente una superficie piana riscaldata. La temperatura di tale piastra è abbassata a salti di 10 gradi e per ogni temperatura vengono eseguite varie prove con concentrazioni diverse. Questo procedimento viene ripetuto fin tanto che non avviene alcuna esplosione a qualsiasi concentrazione. La minima temperatura di accensione è il più basso valore di temperatura che provoca l'accensione della polvere.

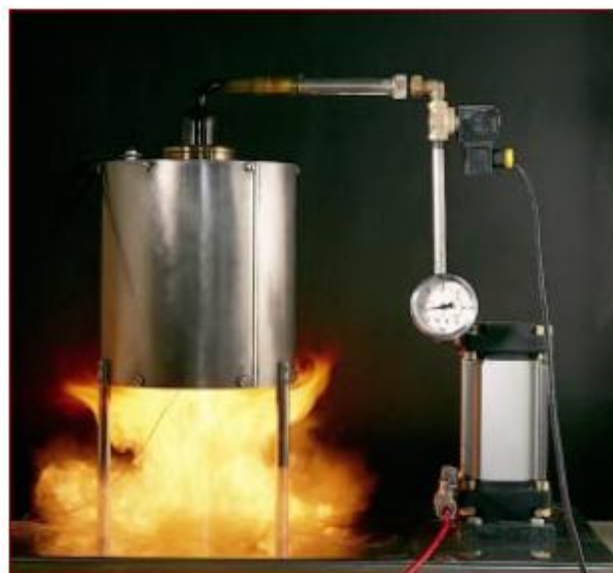



Figura 1.18 – Prova di laboratorio per misurare la MIT di una nube di polvere combustibile.

Per quanto riguarda la minima temperatura di accensione di uno strato di polvere si procede in modo analogo ponendo la polvere su una piastra riscaldata o nel forno Bam. La temperatura è determinata quando si nota la fiamma sullo strato di polvere o quando una termocoppia posta

all'interno del campione di polvere misura una temperatura, di solito 50 °C, rispetto alla termocoppia a contatto con la superficie calda. In questa prova si può anche studiare il fenomeno della combustione covante[j] nello strato di polvere.

Figura 1.19 – Prova di laboratorio per misurare la MIT di uno strato di polvere.

Allorché sono noti tutti gli sopraccitati parametri è possibile conoscere la severità dell'esplosione di quella polvere.

Tipo polvere	MEC [g m^{-3}]	MEP [bar g]	MRPR [bar s^{-1}]	MIE [mJ]	MIT [°C]	Note
Erba medica	100	6,1	76	320	460	alfalfa
Amido di mais	40	10,0	**656**	30	390	
Riso	50	7,3	187	50	440	
Zucchero	15	7,6	345	30	330	
Farina di frumento	50	7,6	256	50	380	Wheat flour
Cereale	60	5,5	48	128	420	grain

Tabella 1-11 – Grandezze dell'esplosività di polveri di origine agricola – Emergono la pericolosità dell'amido di mais e la sensibilità dell'accensione dello zucchero. Fonte: NFPA 68:2007

[j] È causa d'innesco di un'esplosione spesso trascurata o sottovalutata.

Type of Dust	Maximum Pressure (kPA)	Maximum Rate of Pressure Rise (MPa/s)	Ignition Temperature Cloud (^{o}C)	Ignition Temperature Layer (^{o})	Minimum Ignition Energy (J)	Lower Explosive Limit (g/m^3)
Alfalfa meal	455	7.6	460	200	0.32	100
Cereal grass	360	3.5	550	220	0.80	200
Corn	655	41	400	250	0.04	55
Corncob grit	760	21	450	240	0.045	45
Corn dextrin pure	725	48	400	370	0.04	40
Cornstarch commercial product	745	48	380	330	0.04	45
Cornstarch through 325 mesh	790	62	390	350	0.03	40
Flax shive	560	5.5	430	230	0.08	80
Grain dust, winter wheat, corn, oats	790	38	430	230	0.03	55
Grass seed, blue	165	1.4	490	180	0.26	290
Rice	640	18	440	220	0.05	50
Rice bran	420	9.0	490	---	0.08	45
Safflower meal	580	20	460	210	0.025	55
Soy flour	540	5.5	540	190	0.10	60
Soy protein	660	65	520	260	0.05	35
Wheat, untreated	710	25	500	220	0.06	65
Wheat flour	655	26	380	360	0.05	50
Wheat starch, edible	690	45	420	---	0.025	45
Wheat straw	680	41	470	220	0.050	55

SOURCE: U.S. Bureau of Mines 1961.

Tabella 1-12 Proprietà sull'esplosività di comuni polveri di origine agricola. Fonte: Committee on evaluation of industrial hazards, Prevention of Grain Elevator and Mill Explosions, National Academy Press, Washington, 1982

Dust	Maximum pressure, P_m (bar(g))	Maximum rate of pressure rise, $(dP/dt)_{max}$ (bar/s)	Estimated burning velocity, $S_{u,o}$ at atmospheric pressure and 300 K (m/s)
Alfalfa	4.55	76	0.20
Aluminum, atomized	6.20	480	0.75
Aluminum, flaked	6.50	690	0.95
Antimony	0.55	7	0.49
Cellulose acetate	5.40	152	0.29
Cellulose acetate	5.85	248	0.43
Cellulose acetate	6.85	414	0.52
Chromium	3.50	255	1.08
Cinnamon	7.85	270	0.26
Citrus peel	3.50	76	0.33
Corn (maize) starch	7.95	620	0.59
Cotton linters	3.30	10	0.06
Gilsonite	6.15	262	0.43
Hemp hurd	7.10	690	0.82
Hydroxyethyl cellulose	7.30	180	0.20
Hydroxypropyl cellulose	5.80	200	0.33
Lignite, brown	5.70	172	0.30
Magnesium	6.75	760	0.98
Onion	1.25	7	0.16
Pittsburgh coal	5.70	160	0.26
Polyethylene	5.70	172	0.30
Polypropylene	4.75	193	0.46
Shellac	5.05	248	0.56
Sorbic acid	5.50	345	0.66
Stearic acid	6.00	290	0.46
Sulfur, 100% 44 μm	3.85	213	0.75
Titanium	6.20	760	1.15

Source: Nagy and Verakis, 1983.

Tabella 1-13 Valori della massima pressione d'esplosione, della massima velocità di crescita della pressione ricavate a temperatura ambiente e pressione atmosferica, nel reattore di Hartmann di 1,2 l. Con concentrazione 500 g m^{-3}.

È importante ricordare che i valori di k_{st} tabellati dipendono dai campioni e devono essere generalizzati con attenzione.

1.7.5 MINIMA CONCENTRAZIONE D'ESPLOSIVITÀ - MEC [g m^{-3}]

La minima concentrazione d'esplosione, in anglosassone "Minimum Explosible Concentration", determina la concentrazione in volume di polvere combustibile dispersa in aria che può produrre e sostenere la combustione: al di sotto di questo valore la combustione non è più possibile, cioè la propagazione della fiamma non avviene.

Questo valore a volte è indicato anche come limite inferiore d'esplosività (Lower explosion limit – LEL), più utilizzato per le miscele di gas infiammabile ed aria.

Anche la prova per misurare la MEC viene eseguita nel tubo di Hartmann o con il reattore sferico di 20 litri.

Come per i gas esiste un limite superiore d'esplosività (UEL), anche le polveri presentano una concentrazione massima d'esplosività. Tuttavia esso, insieme alla MEC, definisce un campo di esplosività così ampio che ha scarso significato consideralo. Invece conoscere la minima concentrazione d'esplosività può essere d'interesse per prevenire l'esplosione in quei luoghi a rischio in cui la concentrazione può essere efficacemente controllata.

Esistono anche dei metodi sviluppati per misurare la massima concentrazione d'esplosività, come per esempio il Metodo di Zehr (1959), citato da Eckhoff, R. K., in Dust explosions in the process industries, 3 ed. Gulf Professional Publishing, New York, 2003.

Per le polveri di origine agricola, la pressione massima generata nell'esplosione e la massima velocità di crescita della pressione si verificano per **concentrazioni superiori a quella stechiometrica almeno tre o quattro volte**.

Anche se l'intervallo di esplosività è stretto, il comportamento della miscela esplosiva varia. Forme tipiche della velocità di aumento della pressione di esplosione e dell'energia minima di accensione sono riportate nelle figure sottostanti per l'amido di mais con basso contenuto di umidità in aria a temperature e pressione standard: la concentrazione di esplosività minima è circa 70 [g m^{-3}], la concentrazione stechiometrica 235 [g m^{-3}] la concentrazione del caso peggiore è intorno ai 500 [g m^{-3}] e la massima concentrazione di esplosività è nell'intervallo 1500 ÷ 2500 [g m^{-3}].

I valori di LEL sono di gran lunga oltre i limiti di pericolo delle polveri in termini di benessere microclimatico (con una concentrazione di polvere pai a 50 g m^{-3}, la luce non riesce ad attraversare una distanza di 3 m.

1.7.6 INTERVALLO DI ESPLOSIVITÀ

Una polvere sospesa in aria può esplodere quando la concentrazione (cioè la massa di polvere per unità di volume) cade entro determinati limiti. La figura 3.3 mostra i limiti di esplosività che ha l'amido di mais in condizioni standard di temperatura e pressione.

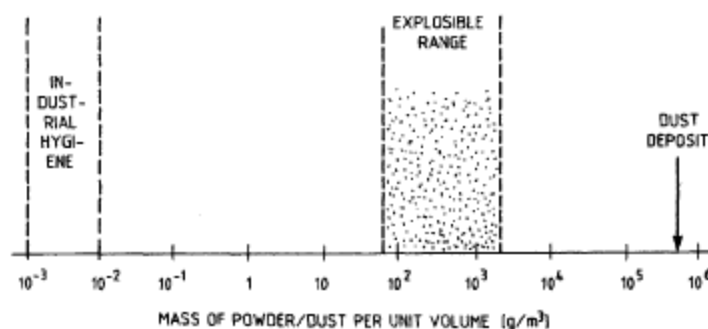



Figura 1.20 Intervallo di esplosività in aria a temperatura ambiente e pressione atmosferica dell'amido di mais con indicazione dei limiti adottati nell'igiene industriale e con la densità degli strati di polvere che si possono formare.

L'intervallo di esplosività è abbastanza esteso, estendendosi sui due ordini di grandezza e precisamente dai 50 ai 100 g m^{-3} fino a 2-3 kg m^{-3}.

La concentrazione di polvere in aria non è funzione costante dello spazio, con maggiori differenze spaziali rispetto al comportamento dei gas, quindi il controllo dell'intervallo di infiammabilità è una misura di prevenzione che occorre progettare accuratamente.

BIBLIOGRAFIA GENERALE

[1] Barton, J. Dust Explosion Prevention and Protection: A Practical Guide.

[2] Bartknecht, W. (1993) Explosions: Course, Prevention and Protection. Springer Verlag, Berlin

[3] Bjerketvedt, D., Bakke, J. R., and Van Wingerden, K. C. M. (1996). Gas explosion Handbook.

[4] Cardillo, P. (2002). "Le esplosioni di gas, vapori e polveri."

[5] Cardillo, P. M. N. (1998). "Le esplosioni di polveri nell'industria alimentare." Industria conserve, 73(2), 135-144.

[6] Cashdollar, K. (2000). "Overview of dust explosibility characteristics." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 183-199.

[7] Cashdollar, K. H. M. (1987). Industrial Dust Explosions, ASTM International.

[8] Davletshina, T. A., and Cherimisinoff, N. P. Fire and explosion hazards handbook of industrial chemicals, Westwood, New Jersey, USA.

[9] Di Nenno, P., Drysdale, D., Beyler, C., Walton, D., Custer, R., Hall, J., and Watts, J. "Explosions." In: S.F.P.E. Handbook of fire protection engineering, N. F. P. Association. and S. F. P. Engineers, eds.

[10] Drysdale, D. (1999). An introduction to fire dynamics, Edinburgh.

[11] Eckhoff, R. K., (2003) Dust Explosions in the Process Industries, Gulf Professional Publishing Elsevier Science, Third Edition, U.S.A.

[12] Eckhoff, R. K. (2005). "Current status and expected future trends in dust explosion research."

[13] Factory Mutual Research Corporation, Dynamics of Dust Explosions, Journal of Fire Technology, Current Research Activities, November 1988, Pagg. 356-359

[14] Grossel, S. S. (1995). "Fire and explosion hazard in powder handling and processing." In: Handbook of powder science.

[15] Grossel, S. S., and Zalosh, R. (2004). Guidelines for Safe Handling of Powders and Bulk Solids, Wiley-AIChE, New York.

[16] Lautkaski, R. (1997). "Understanding vented gas explosions." Espoo.

[17] Lee et al., (1987) Influence of turbulence on closed volume explosion of dust-air mixtures, Archivum Combustion

[18] Lees. Loss Prevention in the Process_Industries.

[19] Lunn, G. Guide to Dust Explosion Prevention and Protection

[20] Nagy John, Verakis Harry C., Development and Control of Dust Explosions, CRC Press, New York, U.S.A. 1983

[21] Nolan, D. (1996). Handbookf Of Fire And Explosion Protection.

[22] Sapko, M. J., Weiss, E. S., Cashdollar, K., and Zlochover, I. A. (2000). "Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 229-242.

[23] Schroll, R. C. Industrial Fire Protection Handbook, Second Ed., CRC Press.

[24] Silvestrini, M. G., B. (2005). Dinamica delle reazioni esplosive.

[25] Silvestrini, M. G., B. (2006). Direttive ATEX - Prevenzione e protezione dai rischi di esplosione delle polveri.

[26] U.S. Chemical Safety and hazard investigation board. (2006). "Combustible dust hazard study."

[27] Zalosh, R. (2000). "Explosion Protection." In: Fire Protection Handbook, S. o. F. P. Engineers, ed.

[28] Zalosh, R. (2002). "Explosions." In: Fire Protection Handbook, N. F. P. Association., ed.

BIBLIOGRAFIA DI SEZIONE

[29] Baker, C. G. J., Ranken, M. D., and Kill, R. C. (1997). Food Industries Manual, Springer.

[30] Barbosa-Canovas, G., Ortega-Rivas, E., Pablo, J., and Yan, H. (2005). Food Powders, Kluwer Academic/Plenum Publisher, New York.

[31] Bradley, D., and Lee, J. H. S. (1988). "Burning rates in turbulent fine dust air explosions." First International Colloquium on the explosibility of industrial dusts, 220-223.

[32] Dahoe, A. E. a. b., Hanjalic, K. c., and Scarletta, B. a. (2002). "Determination of the laminar burning velocity and the Markstein length of powder–air flames." Powder Technology, 122(2-3), 222-238.

[33] Eckhoff, R. K. (2006). "Differences and similarities of gas and dust explosions: A critical evaluation of the European 'ATEX' directives in relation to dusts " Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(6), 553-560.

[34] Kaletunc, H., and Breslauer, K. (2003). Characterization of flour and cereals, Marcel Dekker, New York.

[35] Kent, N. L., and Evers, A. D. (1994). Technology of Cereals: An Introduction for Students of Food Science and Agriculture, Pergamon.

[36] Owens, W. G. (2001). "Wheat, corn and coarse grains milling." In: Cereal processing technology, Woodhead Publishing Ltd.

CAPITOLO 2
CONTESTO NORMATIVO EUROPEO E NAZIONALE

2.1 PREMESSA

La prima esplosione di polvere che si ricordi nel mondo è avvenuta a Torino nel 1875 in un mulino di un fornaio. Nonostante ciò, in Italia gli incidenti dovuti ad esplosioni di polveri nel settore dell'industria alimentare non sono registrati da nessuna agenzia. Il database dell'Inail non differenzia gli incidenti mortali sul lavoro in base al tipo di sostanza coinvolta, ma tiene conto della causa dell'infortunio (oggetto che ha colpito individuo). Tuttavia da comunicazioni private con rappresentanti delle maggiori associazioni di categoria dell'industria molitoria (Italmopa, Antim, Grandimolini), si è evidenziato che vi sono molti incidenti che rimangono non denunciati o che riportano soltanto i media locali.

In Europa esiste un database denominato MARHS che raccoglie tutti gli incidenti dovuti a sostanze chimiche ritenute pericolose secondo le direttive Seveso.

Negli Stati Uniti, dalla prima metà del '900 sono stati riportati gli incidenti verificatisi nel settore dell'industria estrattiva del carbone e quelli dovuti alle polveri di grano e mais (cereali e frumento). Sono quindi disponibili in Internet dati aggiornati annualmente sulle esplosioni avvenute a causa di polveri di origine agricola[k].

Si registra che in Europa le esplosioni di polvere combustibili che avvengono sono circa 2000 esplosioni/anno. Nonostante il quadro incompleto sui dati necessari ad inquadrare la gravità del

[k] www.oznet.ksu.edu/pr_histpubs/Pubs

fenomeno, le leggi, che si esporranno di seguito, si occupano delle esplosioni di polveri nell'industria.

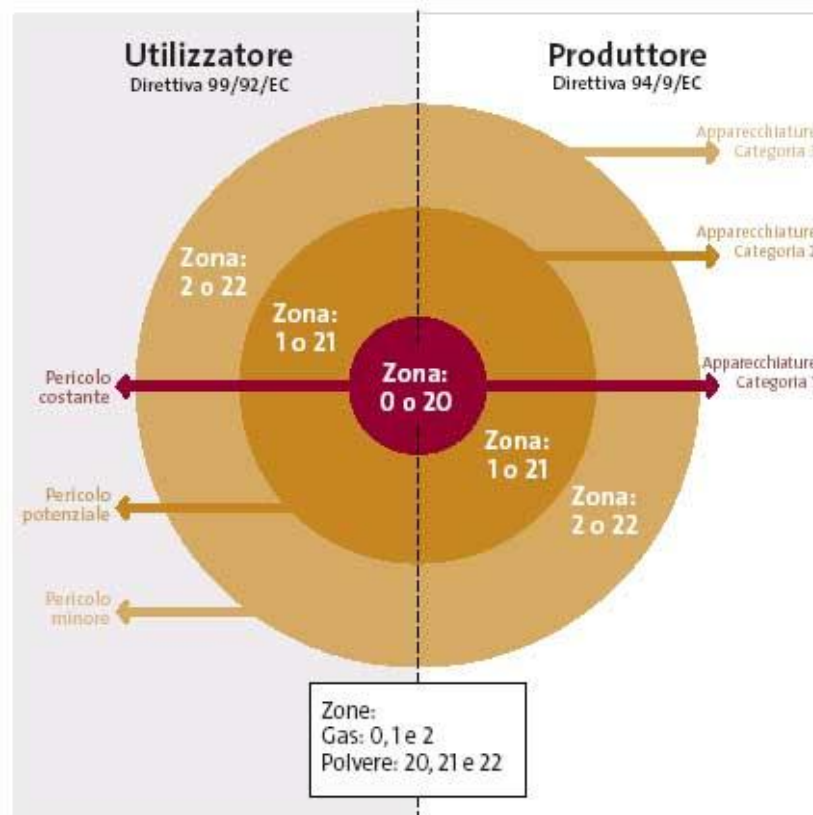



Figura 2.1 – Diagramma di confronto che evidenzia la complementarietà delle due Direttive ATEX (Grundfos®)

2.2 LE DIRETTIVE EUROPEE ATEX

Le direttive ATEX (dal francese Atmosphére explosible) sono state emanate con lo scopo di: creare prodotti adatti ad essere utilizzati in atmosfere con il pericolo di esplosione e di migliorare la sicurezza sui luoghi di lavoro dove esista tale rischio per i lavoratori.

La Direttiva 94/9/CE del Parlamento e della Commissione Europei, del 23 marzo 1994, sul "ravvicinamento degli Stati membri relative agli apparecchi e ai sistemi di protezione destinati ade essere utilizzati in atmosfere potenzialmente esplosive" è stata recepita in Italia con il D.P.R. 126/1998 ed è entrato in vigore soltanto nel luglio 2003[1].

La Direttiva 99/92/CE del Parlamento e della Commissione Europei del 16 Dicembre 1999 relativa alle "prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio delle atmosfere esplosive", è la direttiva sull'argomento previsto dall'art. 16, c.1 della Direttiva Europea 89/391/CEE sul miglioramento sul luogo di lavoro della sicurezza dei lavoratori. Essa è stata recepita in Italia con il D.Lgs. 233/2003. Dapprima è stato aggiunto come Titolo VIII Bis nel D.Lgs. 626/94, ora è diventato il Titolo XI del D.Lgs. 81/2008.

Si vuole osservare i limiti delle Direttive ATEX rispetto alle esplosioni di polveri, perché esse sono nate soprattutto per la protezione dal pericolo di esplosioni di gas. Infatti, sebbene una volta che in un ambiente è presente una miscela di gas infiammabile oppure una nube di polvere dispersa in aria esplosiva i due pericoli presentano le stesse caratteristiche di accensione e combustione, ci sono due importanti differenze di comportamento delle polveri combustibili rispetto ai gas:

(1) I fenomeni di *formazione, mantenimento e movimento a livello microscopico* delle nubi di polvere: infatti le particelle di polvere hanno dimensioni molto maggiori di quelle delle molecole di aria (soprattutto nell'intervallo 1-100 μm) e quindi il loro movimento all'interno dell'aria è dominato dalle forze di massa, inclusa la forza di gravità, piuttosto che dalle forze molecolari. Inoltre mentre gli urti tra due molecole di un gas sono elastici, quelli tra due particelle di polvere possono portare alla formazione di agglomerati di polvere e in questo modo si favorisce la sedimentazione delle particelle.

[1] Dal 30 giugno 2003 non è stato più possibile commercializzare macchine, materiali, dispositivi fissi o mobili, organi di comando, strumentazione e sistemi di rilevazione e di prevenzione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva non marcati CE secondo la direttiva 94/9/CEE.

(2) L'intervallo di esplosività: infatti mentre per i gas la propagazione della fiamma è limitata dalla condizione che la concentrazione della miscela sia tra il limite inferiore il limite superiore di esplosività, per le polveri combustibili la formazione della nube può essere alimentata anche da *strati e depositi* che possono alimentare la fiamma o dare origine al fenomeno della combustione covante a causa della'aria che è contenuta tra le particelle di polvere.

Queste differenze portano a concludere che all'interno delle attrezzature industriali che trattano polveri combustibili occorre indurre il movimento della polvere per mezzo di macchine operatrici (ad esempio ventilatori) e che all'esterno di queste attrezzature o negli ambienti di lavoro, le particelle di polvere sospesa in aria hanno una una durata limitata all'ordine dei secondi, perché esse tendono a sedimentare non appena è cessata la forza che ne ha generato la sospensione in aria.

Poiché le particelle di polvere hanno dimensioni di diversi ordini di grandezza maggiore di quelle delle molecole di gas, esse non possono propagarsi attraverso piccoli spazi, fessure o fori di dimensioni dell'ordine del millimetro o più piccole. Inoltre le particelle di polvere che riescono ad oltrepassare queste barriere, si depositano e difficilmente possono formare una nuova nube esplosiva. Anche la norma americana NFPA 499[m] , sull'installazione di attrezzature elettriche ove esiste il rischio di esplosione di polveri, ribadisce il concetto che la separazione tra zone pericolose e non pericolose può essere realizzata anche attraverso pareti divisorie leggere e porte lasciate chiuse.

[m] Il titolo è: "Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas".

2.2.1 LA DIRETTIVA SOCIALE 99/92/CE

La direttiva è relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive definite come: "miscele con l'aria, a condizioni atmosferiche, di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo accensione, la combustione si propaga all'insieme della miscela incombusta".

Figura 2.2 – Simbolo di zona in cui vi è il pericolo di esplosione

Il datore di lavoro è obbligato ad adottare provvedimenti dai punti di vista tecnico-organizzativo, formativo e informativo, nonché sotto il profilo delle attrezzature di lavoro e dei dispositivi di protezione individuale. Nell'assolvere gli obblighi di prevenzione e protezione, egli deve valutare i rischi specifici derivanti dalle atmosfere esplosive, tenendo conto almeno di:

- probabilità e durata della presenza di atmosfere esplosive;
- probabilità della presenza, dell'attivazione e dell'efficacia di sorgenti di innesco, comprese le scariche elettrostatiche;
- caratteristiche dell'impianto, sostanze utilizzate, processo e loro possibili interazioni;
- entità degli effetti prevedibili.

Ad integrazione del documento di valutazione dei rischi di cui all'articolo 17 del D.Lgs. 9 aprile 2008 n.81, il datore di lavoro provvede a elaborare e a tenere aggiornato il "documento sulla protezione contro le esplosioni" che dovrà precisare:

- che i rischi di esplosione sono stati individuati e valutati;
- che saranno prese misure adeguate per raggiungere gli obiettivi del presente titolo;
- quali sono i luoghi che sono stati classificati nelle zone pericolose (di cui all'allegato XLIX);
- quali sono i luoghi in cui si applicano le prescrizioni minime di sicurezza (di cui all'allegato L);

- che i luoghi e le attrezzature di lavoro, compresi i dispositivi di allarme, sono concepiti, impiegati e mantenuti in efficienza tenendo nel debito conto la sicurezza;
- che sono stati adottati gli accorgimenti per l'impiego sicuro di attrezzature di lavoro.

Il datore di lavoro deve ripartire in zone le aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive.

L'allegato XLIX definisce sei diverse zone pericolose in funzione dello stato fisico della sostanza (gas/vapore/nebbia o polvere), della frequenza e durata della presenza di atmosfera esplosiva. I fabbricanti di prodotti destinati a essere utilizzati in atmosfere esplosive devono fornire tutti i particolari relativi ai gruppi e alle categorie per decidere in quali zone potranno essere utilizzati i loro prodotti, anche se non potranno prevedere quali zone esisteranno.

La classificazione delle aree pericolose in zone compete all'utente le cui sedi ed attività lavorative contengono o danno luogo a tali pericoli.

Si deve comunque tener presente che tra le informazioni per l'uso (che i Fabbricanti sono obbligati a fornire), figura anche l'indicazione, laddove necessario, delle aree pericolose situate in prossimità dei dispositivi di scarico della pressione (RES 1.0.6 dell'Allegato II Direttiva 94/9/CE).

In definitiva, la sicurezza dal rischio di esplosione può essere raggiunta unicamente con il contributo, ed il reciproco scambio informativo, sia del fabbricante che dell'utilizzatore.

Per la determinazione del tipo di zona, della sua estensione e dei suoi dati caratteristici dove sono o possono essere presenti polveri combustibili si applica la norma CEI EN 61241-10. La procedura di classificazione delle aree, ma in linea generale, si può ricondurre ai seguenti passi:

- Individuazione delle sorgenti di emissione;

  per le polveri l'espressione sorgente di emissioni non è applicabile, perché un incidente con esplosioni di polvere può essere iniziato da una nube di polvere ed aria, o da uno strato di polvere, ma non da un rilascio di polvere combustibile all'esterno di un'attrezzatura. Per le polveri è più opportuno utilizzare il termine "Area di sviluppo di una nube di polvere" [6].
- Assegnazione del grado di emissione alle sorgenti (considerando le eventuali contemporaneità di più sorgenti);
- Determinazione della portata di emissione del fluido in considerazione (gas, vapore, liquido bassobollente o altobollente);
- Calcolo del volume ipotetico di atmosfera potenzialmente esplosiva intorno alla SE (Vz);
- Calcolo della concentrazione media volumica (Xm%);

- Valutazione del tempo di permanenza;
- Determinazione del tipo di zona individuata;
- Determinazione della forma della zona pericolosa;
- Determinazione dell'estensione della zona pericolosa (considerando eventuali aperture);
- Inviluppo delle diverse zone pericolose individuate;

Si riportano di seguito le definizioni di zone così come riportate nella norma UNI EN 1127-1:

Zona 20 : Luogo in cui un'atmosfera esplosiva sotto forma di una nube di polveri combustibili nell'aria è presente continuamente, o per lunghi periodi, o frequentemente. In generale, dette condizioni, quando si presentano, interessano l'interno di serbatoi, tubi e recipienti, ecc.

Esempi di luoghi che possono dare origine a zone 20:

- l'interno dei sistemi di contenimento di polveri:
- tramogge, sili, cicloni, filtri, ecc.;
- sistemi di trasporto polveri, eccetto alcune parti dei trasportatori a nastro e a catena, ecc;
- interno di miscelatori, mulini, essiccatori, apparecchiature per insacco, ecc.

Zona 21 : Luogo in cui è probabile che un'atmosfera esplosiva, sotto forma di una nube di polveri combustibili nell'aria, si presenti occasionalmente durante il normale funzionamento. Detta zona può comprendere, per esempio, tra gli altri, luoghi nelle immediate vicinanze di punti di caricamento e svuotamento di polveri e luoghi in cui si formano strati di polvere o che,

durante il normale funzionamento, potrebbero produrre una concentrazione esplosiva di polveri combustibili in miscela con l'aria.

Esempi di luoghi che possono dare origine a zone 21:

- aree esterne ai contenimenti di polvere e nelle immediate vicinanze di porte di accesso, soggette a rimozione o apertura frequente per scopi di funzionamento, in presenza di miscele esplosive di polvere /aria all'interno;
- aree esterne ai contenimenti di polveri e nelle vicinanze di punti di riempimento e di svuotamento, nastri trasportatori, punti di campionamento, stazioni di scarico autocarri, punti di scarico dai nastri, ecc., ove non vengano prese misure per evitare la formazione di miscele esplosive di polvere /aria;
- aree esterne ai contenimenti di polveri dove si accumulano polveri e dove, a causa delle operazioni di processo, lo strato di polvere può essere disturbato e formare miscele esplosive di polvere /aria;

- aree all'interno di contenimenti di polveri dove possono formarsi nubi esplosive di polvere (ma non in modo continuo, né per lunghi periodi, né frequentemente) come per es. sili (se riempiti e/o svuotati solo occasionalmente) e il lato sporco di filtri in caso di lunghi intervalli di auto-pulizia.

Zona 22 : Luogo in cui è improbabile che un'atmosfera esplosiva, sotto forma di una nube di polvere combustibile nell'aria, si presenti durante il normale funzionamento, ma che, se si presenta, persiste solo per un breve periodo. Questa zona può comprendere, tra gli altri, luoghi in prossimità di apparecchi, sistemi di protezione e componenti contenenti polveri, dai quali le polveri possono fuoriuscire a causa di perdite e formare depositi di polveri (per esempio sale di macinazione, in cui la polvere fuoriesce dai mulini e si deposita).

Esempi di luoghi che possono dare origine a zone 22:

- scarico in ambiente dagli sfiati dei filtri, in quanto, in caso di malfunzionamento, possono verificarsi emissioni di miscele di esplosive polvere / aria;
- luoghi vicini ad apparecchiature che devono essere aperte a intervalli non frequenti, o apparecchiature che, sulla base dell'esperienza, possono facilmente formare perdite, con espulsione violenta delle polveri, a causa di una pressione superiore a quella atmosferica:
- apparecchiature pneumatiche, collegamenti flessibili, suscettibili di danneggiamento, ecc.
- magazzini di sacchi contenenti prodotti polverosi. Durante la movimentazione possono verificarsi danni ai sacchi, tali da causare perdite di polvere.
- aree normalmente classificate come zone 21 possono rientrare in zona 22 quando vengono attuate misure per evitare la formazione di miscele di esplosive polvere /aria. Tali misure comprendono sistemi di ventilazione dell'aria. Le misure dovrebbero essere utilizzate nelle vicinanze dei punti di riempimento e svuotamento (dei sacchi), nastri trasportatori, punti di campionamento, stazioni di scarico camion, punti di scarico nastri, ecc.
- aree nelle quali si formano strati di polveri controllabili, suscettibili di diventare miscele di esplosive polvere /aria. L'area viene designata come non pericolosa solo se lo strato viene rimosso mediante pulizia prima che possano formarsi miscele pericolose di polveri/ aria.

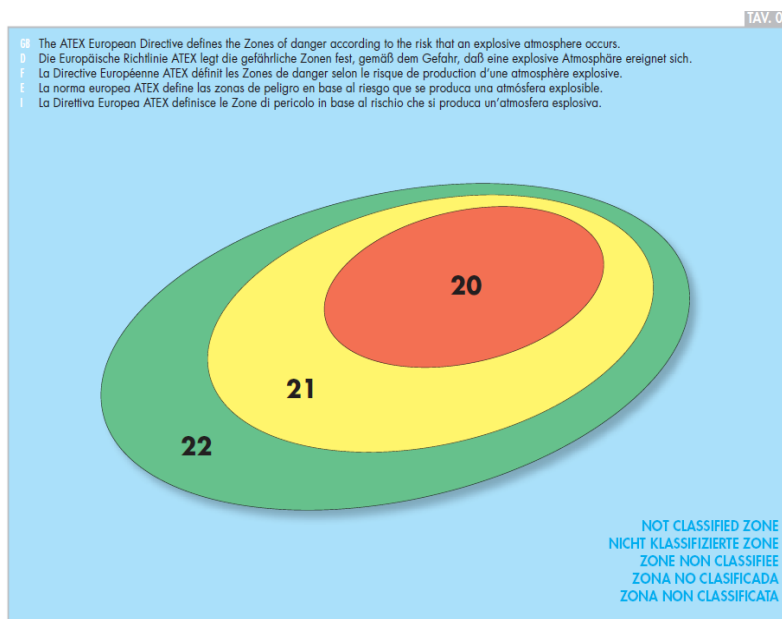



Figura 2.3 – Schema che chiarisce la pericolosità delle aree con pericolo di esplosione. (Copyright MIX SRL – ATEX Filters).

Per la determinazione del tipo di zona, della sua estensione e dei suoi dati caratteristici dove sono o possono essere presenti polveri combustibili si applica la norma EN 61241-10. Tale norma sostituisce la precedente EN 50281-3 e non si applica alle aree minerarie sotterranee, alle miscele ibride e alle polveri di esplosivi o sostanze piroforiche. La procedura di classificazione prevede innanzitutto di identificare le caratteristiche dei materiali quali la dimensione delle particelle, il contenuto di umidità, la temperatura minima di accensione della nube e dello strato ecc. Successivamente è necessario identificare il funzionamento dell'impianto/processo al fine di individuare i possibili punti (in tutte le condizioni prevedibili di esercizio) nei quali vi siano contenimenti di polvere o sorgenti di emissione di polvere compresi gli strati. Infine occorre valutare la probabilità di emissione della polvere da tali sorgenti.

2.2.2 LA DIRETTIVA DI PRODOTTO 94/9/CE

La direttiva 94/9/CE si applica a tutti i tipi di apparecchi, sistemi di protezione e componenti destinati ad essere utilizzati in o in relazione a atmosfere potenzialmente esplosive. La direttiva riguarda anche i dispositivi destinati a essere utilizzati fuori dall'atmosfera potenzialmente esplosiva ma utili o indispensabili per il funzionamento sicuro degli apparecchi o sistemi di protezione relativamente ai rischi di esplosione.

Figura 2.4 – Simbolo di attrezzatura destinata all'utilizzo in luoghi con il pericolo d'esplosione

Un'atmosfera suscettibile di trasformarsi in atmosfera esplosiva a causa delle condizioni locali e/o operative viene chiamata "atmosfera potenzialmente esplosiva". Le condizioni atmosferiche di riferimento sono quelle per le quali la concentrazione di ossigeno nell'atmosfera è approssimativamente del 21% e che includono variazioni di pressione e temperatura al di sopra ed al di sotto dei livelli di riferimento di 101,3 kPa e 20°C (condizioni atmosferiche normali), purché tali variazioni abbiano un effetto trascurabile sulle proprietà esplosive delle sostanze. Le condizioni atmosferiche previste come base per le prove di conformità alle norme tecniche (EN 50014, EN 13463-1) indicano una gamma di variazioni di temperatura da – 20°C a + 40°C ed una gamma di variazioni di pressione da 0,8 bar a 1,1 bar.

Dal 1° luglio 2003, tutti i prodotti immessi sul mercato o messi in servizio devono essere conformi alla direttiva 94/9/CE. La direttiva 94/9/CE si applica a tutti i prodotti immessi sul mercato dell'UE, fabbricati sia all'interno che al di fuori della Comunità. Le definizioni dei prodotti compresi nella direttiva sono le seguenti:

- Apparecchi art. 1, paragrafo 3(a): Si intendono le macchine, i materiali, i dispositivi fissi o mobili, gli organi di comando, la strumentazione e i sistemi di rilevazione e di prevenzione che, da soli o combinati, sono destinati alla produzione, al trasporto, al deposito, alla misurazione, alla regolazione e alla conversione di energia ed alla trasformazione di materiale e che, per via delle potenziali sorgenti di innesco che sono loro proprie, rischiano di provocare un'esplosione

- Sistemi di protezione art. 1, paragrafo 3(b) : I dispositivi, diversi dai componenti, la cui funzione è bloccare sul nascere le esplosioni e/o circoscrivere la zona colpita dalle fiamme e dalla pressione derivante dall'esplosione che sono immessi separatamente sul mercato come sistemi con funzioni autonome.

- Componenti art. 1, paragrafo 3(c) : Parti essenziali per il funzionamento sicuro degli apparecchi e dei sistemi di protezione (in caso contrario non rientrerebbero nella direttiva); ma privi di funzione autonoma (in caso contrario sarebbero considerati apparecchi, sistemi di protezione o dispositivi ai sensi dell'articolo 1, paragrafo 2).

- Dispositivi di sicurezza, controllo e regolazione art. 1, paragrafo 2 : Un qualunque dispositivo utile o necessario per il funzionamento sicuro degli apparecchi e/o sistemi di protezione ai fini dell'esplosione, destinati ed essere utilizzati al di fuori di atmosfere potenzialmente esplosive.

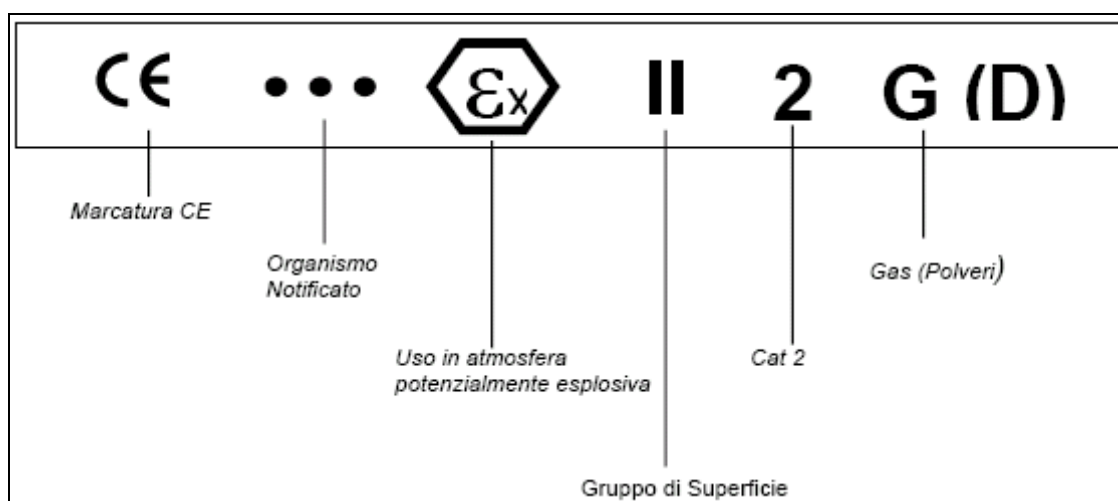



Figura 2.5 – Schema dei simboli riportati sugli apparecchi destinati ad essere utilizzati in atmosfere esplosive.

La direttiva si applica agli apparecchi, sistemi di protezione, componenti e dispositivi in tutte le fasi della loro utilizzazione, pertanto, nell'ambito della valutazione del rischio, le considerazioni esposte nel presente documento devono estendersi a tutte le seguenti fasi:

- normale esercizio;
- avviamento;
- fermata;
- manutenzione;
- eventualmente altro;

La direttiva 94/9/CE ha ampliato il campo di applicazione rispetto al quadro legislativo preesistente in quanto ha stabilito i requisiti essenziali di sicurezza relativi a:

- apparecchi non elettrici destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva;
- apparecchi destinati a essere utilizzati in ambienti potenzialmente esplosivi a causa dei pericoli derivanti dalla presenza di polveri;
- sistemi di protezione ed ai dispositivi destinati a essere utilizzati fuori dall'atmosfera esplosiva, utili o indispensabili per il funzionamento sicuro degli apparecchi o sistemi di protezione relativamente ai rischi di esplosione;

La direttiva prende in esame tutti i tipi di sorgenti di innesco quali:

- Superfici calde;
- Fiamme e gas caldi (incluse le particelle calde);
- Scintille di origine meccanica;
- Materiale elettrico;
- Correnti elettriche vaganti, protezione contro la corrosione catodica;
- Elettricità statica;
- Fulmine;
- Onde elettromagnetiche a radiofrequenza (RF) da 104 Hz a 3x1012 Hz;
- Onde elettromagnetiche da 3x1011 Hz a 3x1015 Hz;
- Radiazioni ionizzanti;
- Ultrasuoni;
- Compressione adiabatica e onde d'urto;
- Reazioni esotermiche, inclusa l'autoaccensione delle polveri;

La direttiva 94/9/CE prevede degli obblighi a carico della persona che immette i prodotti sul mercato e/o li mette in servizio, sia che si tratti del fabbricante, del suo mandatario, dell'importatore o di qualsiasi altra persona responsabile. La direttiva non regola l'uso degli apparecchi utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva. Questi aspetti sono infatti regolamentati dalla direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive.

Nell'ambito della direttiva, gli apparecchi, compresi i dispositivi e i componenti, sono suddivisi in **due gruppi**:

(1) Gruppo I comprende gli apparecchi destinati a essere utilizzati nei lavori in sotterraneo nelle miniere e nei loro impianti di superficie, esposti al rischio di sprigionamento di grisù e/o di polveri combustibili.

(2) Gruppo II comprende gli apparecchi destinati a essere utilizzati in altri ambienti in cui vi sono probabilità che si manifestino atmosfere esplosive.

Il gruppo II è suddiviso in **tre categorie** a seconda del grado di protezione che il prodotto deve garantire (grado molto elevato, elevato o normale) anche in relazione all'ambiente d'utilizzo. Quanto maggiore è la possibilità che si verifichi un'atmosfera esplosiva, tanto maggiore deve essere il livello delle misure di sicurezza adottate. Ad esempio gli apparecchi di categoria 1 devono avere le seguenti caratteristiche:

- devono garantire un grado di protezione molto elevato;
- questo grado di protezione deve essere assicurato anche in caso di guasto eccezionale dell'apparecchio tramite mezzi di protezione tali che: -in caso di guasto di uno dei mezzi di protezione, almeno un secondo mezzo indipendente assicuri il livello di sicurezza richiesto, oppure qualora si manifestino due guasti indipendenti uno dall'altro, sia garantito il livello di protezione richiesto.
- sono destinati ad ambienti in cui si rileva, sempre, spesso o per lunghi periodi, un'atmosfera esplosiva dovuta a miscele di aria e gas, vapori, nebbie o miscele di aria e polveri.
- devono soddisfare ai requisiti comuni di cui all'allegato II, punto 1.
- devono soddisfare ai requisiti supplementari di cui all'allegato II, punto 2.1 ovvero devono essere progettati e fabbricati in modo che le sorgenti di innesco non si attivino, neanche in caso di anomalie eccezionali dell'apparecchio.

Lo stesso dicasi per le altre categorie così come riportato nella Tabella 2-1 riepilogativa. La Commissione europea ha stabilito che la categoria dell'apparecchio deve essere determinata sulla base della "valutazione del pericolo di innesco" in relazione all'eventuale atmosfera circostante l'apparecchio e la sua eventuale atmosfera di processo interna. Se la valutazione del pericolo di innesco assicura che gli apparecchi non contengono sorgenti di innesco efficaci durante il normale funzionamento1, gli apparecchi possono essere classificati come apparecchi della categoria 3. Analogamente, nel caso in cui la valutazione del pericolo di innesco assicura che gli apparecchi non contengono sorgenti di innesco efficaci durante le disfunzioni previste2 o le rare disfunzioni3, gli apparecchi possono essere classificati rispettivamente come apparecchi della categoria 2 o 1.

<table>
<tr><th colspan="7">DPR 126/98 - Direttiva 94/9/CE
Requisiti supplementari per gli apparecchi
(compresi i dispositivi ed i componenti ad esso asserviti)</th><th colspan="2">Direttiva 99/92/CE</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Gruppo</th><th rowspan="2">Categoria</th><th colspan="4">Mezzi di protezione</th><th></th><th rowspan="2">Presenza di atmosfera esplosiva</th><th rowspan="2">Zona d'uso</th></tr>
<tr><th>Livello</th><th>Caratteristica di protezione (All. I)</th><th>Caratteristica di costruzione (All. II)</th><th>RES applicabili</th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="3">II</td><td>1</td><td>Molto elevato</td><td>In caso di guasto di un mezzo di protezione, il livello di sicurezza è garantito da almeno un secondo mezzo di protezione indipendente. Inoltre, il livello di sicurezza è garantito anche se si manifestano due anomalie indipendenti una dall'altra</td><td>Devono essere progettati e fabbricati in modo che le sorgenti di innesco non si attivino, neanche in caso di anomalie eccezionali dell'apparecchio.</td><td>1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
2.1</td><td></td><td>Continuativa o per lunghi periodi</td><td>0
1
2

20
21
22</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Elevato</td><td>Il livello di sicurezza è garantito anche in presenza di anomalie ricorrenti o di difetti di funzionamento degli apparecchi di cui occorre abitualmente tenere conto.</td><td>Devono essere progettati e fabbricati in modo da evitare le sorgenti di innesco, anche in caso di anomalie ricorrenti o di difetti di funzionamento degli apparecchi di cui occorre abitualmente tener conto.</td><td>1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
2.2</td><td></td><td>Situazione intermedia tra la precedente e la successiva</td><td>1
2

21
22</td></tr>
<tr><td>3</td><td>normale</td><td>Il livello di sicurezza è garantito nel funzionamento normale.</td><td>Devono essere progettati e costruiti in modo da evitare le sorgenti di innesco prevedibili durante il funzionamento normale.</td><td>1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
2.3</td><td></td><td>Scarsa probabilità e se si verifica è di breve durata</td><td>2

22</td></tr>
</table>

Tabella 2-1 Caratteristiche degli apparecchi appartenenti al Gruppo II

La Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC) ha sviluppato un schema di certificazione per le attrezzature destinate all'uso in atmosfere esplosive denominato IECEx (Certified Equipment Scheme). Il sistema di marchiatura IECEx ha validità di marchio di conformità per le norme tecniche internazionali sulle atmosfere esplosive:

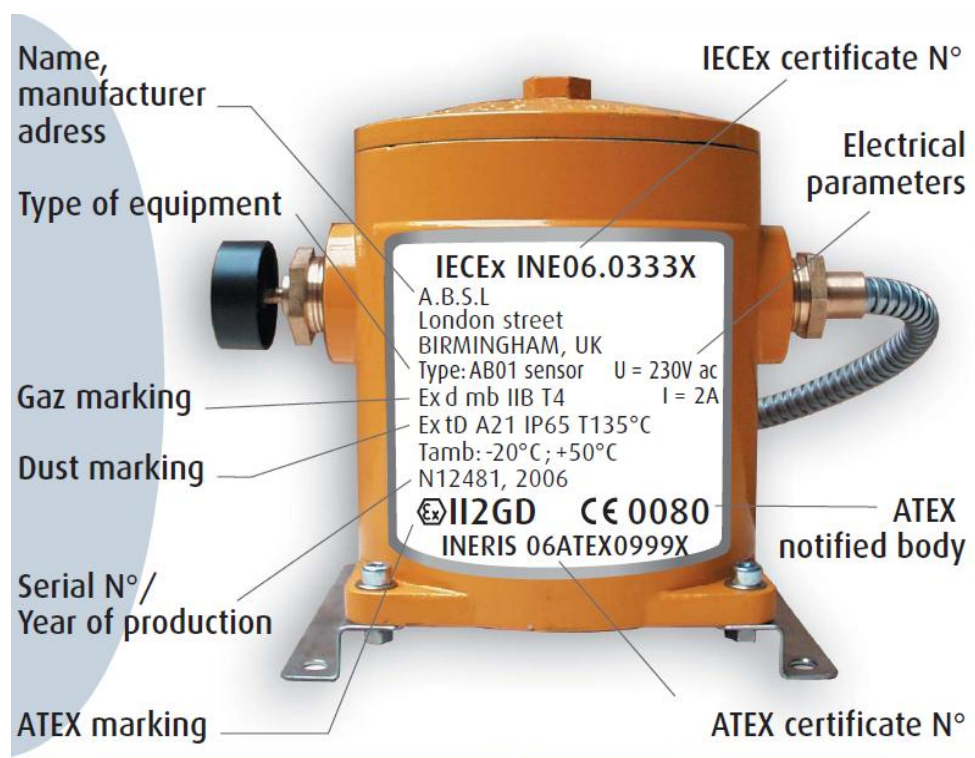



Figura 2.6 – Esempio di marcatura di un'attrezzatura secondo la marcatura IECEx

2.3 AZIENDE SOGGETTE AL CONTROLLO DEI VIGILI DEL FUOCO

La disciplina della prevenzione incendi, uno dei compiti istituzionali del Dipartimento dei Vigili del Foco del Ministero dell'Interno, è regolata dal D.Lgs. 139/2006, e dal D.P.R. 577/1982 per quanto riguarda il regolamento per l'espletamento dei servizi di prevenzione incendi. Il Decreto Ministeriale che stabilisce le attività a rischio d'incendio e d'esplosione e soggette al controllo dei Vigili del Fuoco, attraverso il rilascio del Certificato di Prevenzione Incendi, sono riportate nell'Allegato A al DMI 16.02.1982. Queste 97 attività, suddivise in:

Attività	Grandezza controllata
Attività industriali	Materiale combustibile, Gas infiammabili,Sostanze esplosive e radiogene
Attività commerciali	S > 400 m^2 ; numero di persone presenti
Attività artigianali	Materiale combustibile, Gas infiammabili,Sostanze esplosive e radiogene
Attività civili	numero di persone presenti
Aree a rischio specifico	Centrali termiche, Gruppi elettrogeni

Tabella 2-2 Attività soggette al rilascio del Certificato di Prevenzione Incendi.

Le industrie alimentari, che possono trattare polveri organiche naturali combustibili, sono le seguenti :

INDUSTRIA ALIMENTARE
35) **Mulini per cereali** ed altre macinazioni con potenzialità giornaliera superiore a 200 q.li e relativi depositi
36) **Impianti per l'essiccazione dei cereali e di vegetali** in genere con depositi di capacità superiore a 500 q.li di prodotto essiccato
37) Stabilimenti ove si producono surrogati del **caffè**
38) Zuccherifici e raffinerie dello **zucchero**
39) **Pastifici** con produzione giornaliera superiore a 500 q.li
40) **Riserie** con potenzialità giornaliera superiore a 100 q.li
41) Stabilimenti ed impianti ove si lavora e/o detiene foglia di **tabacco** con processi di essiccazione con oltre 100 addetti e con quantitativi globali in ciclo e/o in deposito superiori a 500 q.li

Tabella 2-3 Industrie alimentari soggette al rilascio del Certificato di Prevenzione Incedi.

BIBLIOGRAFIA DI SEZIONE

[1] Abbasi, T., and Abbasi, S. A. (2006). "Dust explosions – Cases, causes, consequences, and control."

[2] CEI EN 61241-10:2006 "Classificazione delle aree dove sono o possono essere presenti polveri combustibili"

[3] CENELEC.(1998b) Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust. Part1–2: Selection,installation andmaintenance .Europeanstandard EN50281-1-2,September1998, CENELEC Central Office, Brussels.

[4] Decreto Del Presidente Della Repubblica 23 marzo 1998, n. 126 in Gazzetta Ufficiale n. 101 del 04-05-1998 Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva.

[5] Decreto Legislativo 12 giugno 2003, n. 233 "Attuazione della direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive" pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 197 del 26 agosto 2003

[6] Eckhoff, R. K., Differences and similarities of gas and dust explosions: A critical evaluation of the European 'ATEX' directives in relation to dusts Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19 (6), 553-560, 2006

[7] NFPA499.(1997).Recommendedpracticefortheclassificationofcombustibledustsandof hazardous(classified)locationsforelectricalinstallationsinchemicalprocessareas.PublicationNo.499fromNationalFireProtectionAssociation,Quincy,MA,USA

[8] Ott, R. (2005). "Dust explosion Incidents: their causes, effects and prevention. Compendium for industrial practice.", I. P. S. N. 2051, ed., Heidelberg.

[9] UNI EN 1127-1:2001 Atmosfere esplosive Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione Concetti fondamentali e metodologia

[10] Zeeuwen, P. (1997). "Dust explosions: What is the risk? What are the statistics?" Journal of Chilwort Technology.

CAPITOLO 3

FENOMENI COINVOLTI NELLA COMBUSTIONE DELLA NUBE DI POLVERE COMBUSTIBILE ED ARIA

3.1 TIPI DI FIAMME

In generale possiamo classificare il fenomeno della combustione dei gas rispetto alla miscelazione combustibile/comburente in: **fiamma premiscelata** in cui il combustibile gassoso è unito all'aria prima della fase di combustione (per esempio la fiamma di una candela); **fiamma di diffusione** in cui la combustione avviene nella regione spaziale in cui il combustibile e l'aria si miscelano (per esempio incendio di una pozza di liquido infiammabile o combustibile).

Quasi tutte le fiamme che s'incontrano negli incendi sono di quest'ultimo tipo, molto spesso è presente la turbolenza. In prima approssimazione possiamo affermare che la velocità con cui avviene la diffusione dei gas reagenti controlla le dimensioni spaziali della fiamma. La fiamma presenta radiazioni luminose dovute alla presenza del carbonio.

Una differenza fondamentale tra due tipi di fiamma è che nella fiamma di diffusione la reazione chimica di combustione avviene nel rapporto stechiometrico combustibile – comburente.

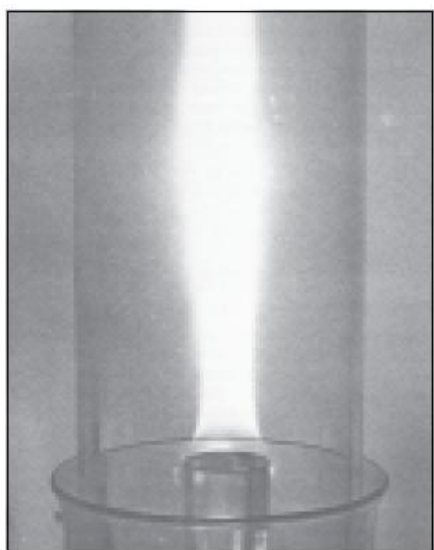



Figura 3.1 – Fiamma di diffusione

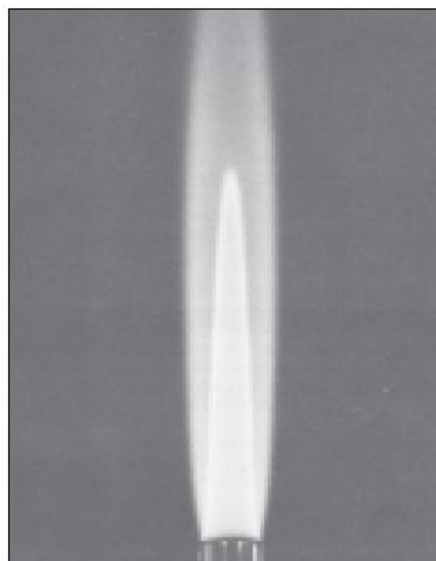



Figura 3.2 – Fiamma premiscelata

È importante conoscere il regime di flusso durante la combustione delle particelle di polvere (laminare o turbolento), perchè da esso dipende la velocità della combustione e quindi anche la sovrapresisone massima raggiunta e la rapidità dell'esplosione. In una fiamma premiscelata, la transizione da fiamma laminare a fiamma turbolenta avviene quando la regione di fluido a monte della fiamma è caratterizzata dalla turbolenza ed il nuovo regime che si ottiene dipenderà dal tipo di flusso (intensità della turbolenza e scala della turbolenza). Generalmente piccoli valori di intensità e grandi scale di turbolenza in confronto allo spessore della fiamma producono fiamme fortemente raggrinzate. Tali fiamme hanno un'area maggiore rispetto alla superficie in direzione perpendicolare a quella di propagazione della fiamma. Invece quando la turbolenza del flusso a monte della fiamma aumenta (grandi intensità) e la misura media dei vortici diventa piccola, diventano elevate le variazioni nell'unità di tempo dei fenomeni di scambio.

In generale quando parliamo di propagazione della fiamma in una nube di polvere, la combustione può avvenire in un'unica fase come per i gas (combustione omogenea, le polveri organiche d'origine agricola presentano questo tipo di combustione) oppure può coinvolgere fasi diverse (combustione eterogenea, le polveri di metallo presentano questo tipo di combustione). Tuttavia occorre osservare che, mentre le distanze tra due molecole di gas ed aria sono dell'ordine molecolare, in una nube di polvere d'aria le distanze tra due particelle sono migliaia di volte superiori a quelle presenti nella miscela di gas ed aria. Perciò possiamo classificare le fiamme in cui bruciano polveri in: **fiamme di Nusselt** (combustione eterogenea, per esempio combustione del carbone, più vicina alla fiamma di diffusione) e **fiamme volatili** (dove la pirolisi

avviene prima della combustione vera e propria e sprigiona vapori e gas. Quindi è più vicina alla fiamma premiscelata - Figura 3.3):

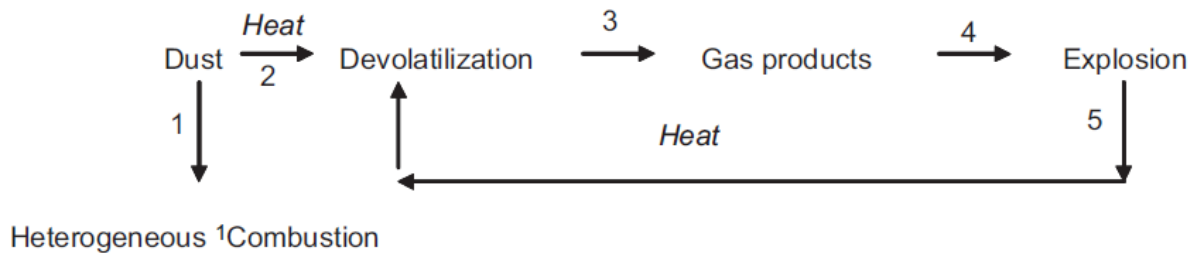



Figura 3.3 – Schema (su scala particellare) dei fenomeni a catena coinvolti nella combustione di una particella di polvere: la catena 2-3-4-5 indica la combustione omogenea→ polvere devolatilizzata+aria; l'altrnativa è la combustione eterogenea(polvere solida+aria) (fonte: Di Benedetto, A. and Russo, P., Thermo-kinetic modelling of dust explosions, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 20 (4-6), 303-309, 2007)

3.2 MECCANISMO DELLA COMBUSTIONE E DELLA PROPAGAZIONE DELLA FIAMMA

Uno dei fenomeni riguardanti le esplosioni di polveri che necessita approfondimento dei ricercatori è sicuramente il meccanismo di combustione che si sviluppa nella nube di polvere ed aria. Infatti la sua conoscenza è importante perché la propagazione della fiamma durante l'esplosione avviene attraverso la combustione della singola particella e quindi è utile per prevenire e proteggere dal pericolo di esplosioni di polveri, per esempio come e con quali sostanze intervenire per sopprimere la combustione.

Un recente studio ha riguardato la combustione di particelle di acido stearico ($C_{18}H_{36}O_2$ contenuto per esempio nel cacao) della dimensione fino a 70 μm, e registrata con una videocamera ad alta velocità munita di filtro UV per evidenziare la zona di combustione della particella (emissione chimica di OH durante la combustione). Come possiamo osservare in Figura 3.4 la propagazione della fiamma in forma pressoché sferica e le zone di reazione sembrano concentrate intorno alle particelle. I punti blu (a temperatura inferiore alla fiamma) indicano una zona di reazione intorno alle particelle che stanno vaporizzando. Quindi saremmo portati a concludere che la combustione avviene in modo simile a quella di una fiamma di diffusione.

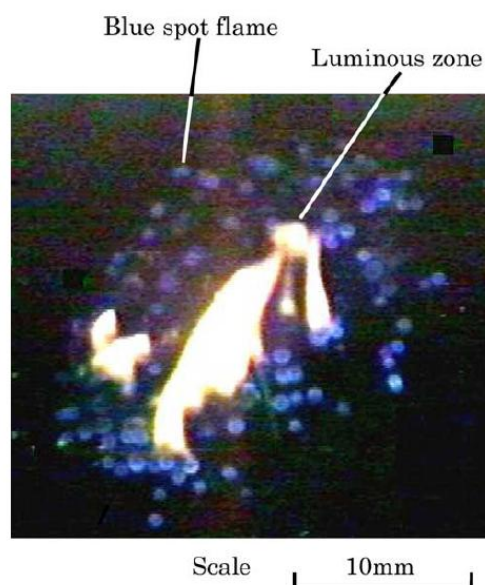



Figura 3.4 – Immagine scattata con fotocamera normale durante la propagazione della fiamma tra le particelle di acido stearico sospese in aria.

Riprendendo invece la combustione con videocamera munita di filtro UV, la zona di combustione appare continua, più simile a quella dei gas. Quindi vuol dire che la combustione si propaga anche attraverso il gas liberato dalle particelle di acido stearico, che hanno iniziato il processo di pirolisi prima che la fiamma le raggiunga. Per questo la combustione delle particelle di polvere organica è simile alla combustione di una fiamma premiscelata (vedi Paragrafo seguente).

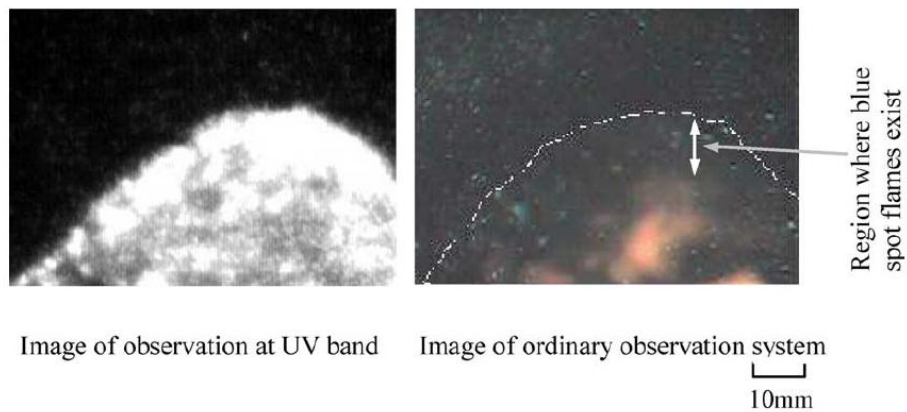



Figura 3.5 Immagine scattata con fotocamera normale. La linea bianca è tracciata per evidenziare il confine della zona in cui ci sono particelle di polvere in blu. Quindi quella linea rappresenta il fronte di fiamma.

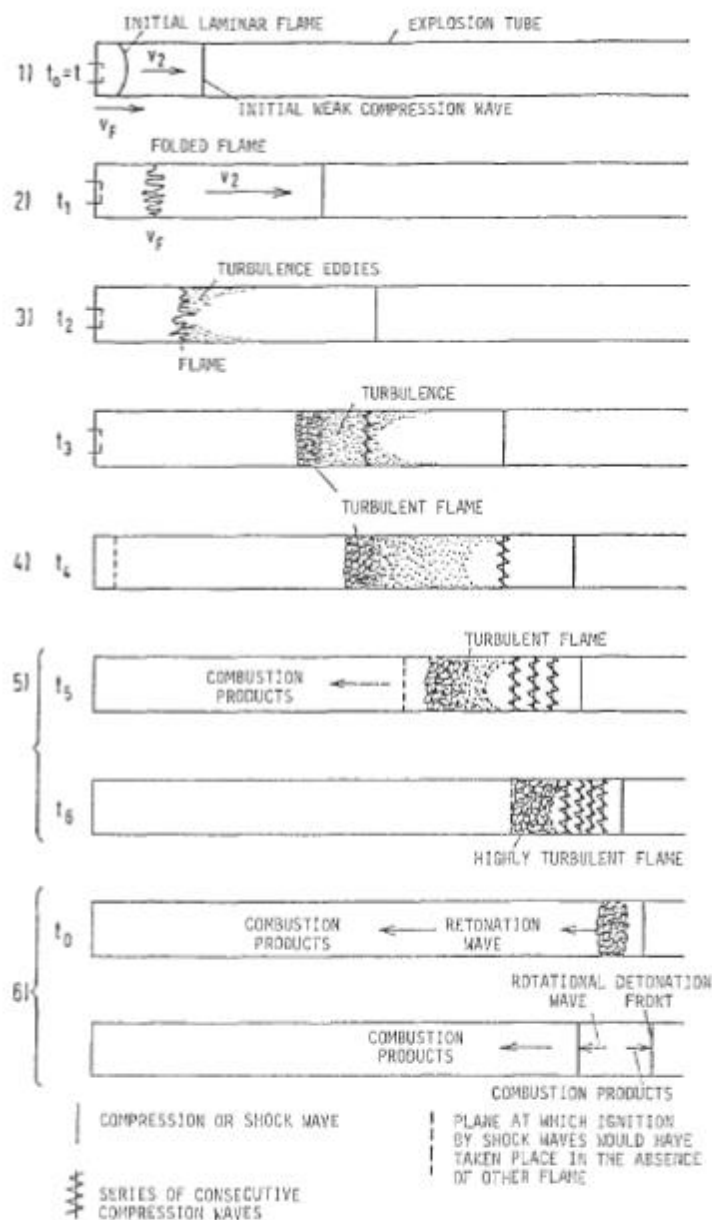



Figura 3.6 – Fenomeno della transizione dell'esplosione da deflagrazione prima laminare, poi turbolenta fino alla detonazione

3.3 LE VELOCITÀ DI COMBUSTIONE E LE VELOCITÀ DI FIAMMA

La velocità di combustione è una grandezza fondamentale che quantifica la forza che guida la combustione (driving force): essa è legata alla variazione di pressione nell'unità di tempo e quindi è utile per prevedere la severità dell'esplosione. Inoltre insieme allo spessore della fiamma, alle proprietà della polvere dispersa in aria e alla turbolenza, la velocità di combustione è utilizzata per descrivere il comportamento dell'esplosione (modelli matematici e fluidodinamici).

Una fiamma è caratterizzata dai suoi reagenti e dai suoi prodotti. Il fronte di fiamma rappresenta la superficie ideale che separa reagenti e prodotti della combustione.

La **velocità di combustione** (S_u) è definita come la velocità con cui il fronte di fiamma piano (o onda di combustione piana) si propaga rispetto alla miscela che non ha reagito ancora che si trova davanti, in una miscela infiammabile stazionaria a riposo di estensione illimitata. La velocità di combustione ha direzione perpendicolare rispetto al fronte di fiamma.

La **velocità di fiamma** (S_f) è la velocità con cui il fronte della fiamma si muove rispetto ad un sistema di riferimento fisso (Drysdale, Introduction to fire dynamics; NFPA 68).

Per capire la differenza tra la velocità di combustione e la velocità di fiamma, consideriamo la miscela infiammabile contenuta in un cilindro di lunghezza l con un'estremità chiusa e l'altra aperta (Figura 3.7). Dopo l'accensione all'estremità chiusa, la fiamma si propaga lungo il cilindro, raggiungendo l'estremità aperta nel tempo. La velocità di fiamma media è in questo caso l/t. Questo valore è notevolmente maggiore della velocità di combustione poiché la miscela infiammabile che si trova davanti al fronte di fiamma si muove a causa dell'espansione dei prodotti della combustione.

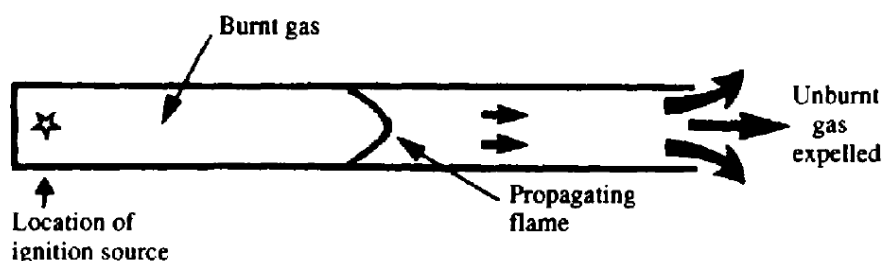



Figura 3.7 – Propagazione di una fiamma premiscelata in un condotto in cui l'accensione avviene all'estremità chiusa. La velocità di combustione sarebbe uguale alla velocità di fiamma se i gas combusti fuoriuscissero dall'estremità dove è avvenuta l'accensione della miscela (se l'estremità fosse aperta).

La velocità di fiamma non può essere messa in relazione con la velocità di combustione semplicemente tenendo conto del moto relativo della miscela ancora incombusta. Infatti ci sono altri fattori che influiscono come per esempio il fronte di fiamma in un piano, le perdite di calore sulle pareti del cilindro e soprattutto il gas ancora incombusto che si muove con moto turbolento. Tuttavia in prima approssimazione, possiamo ricavare una relazione tenendo conto dell'espansione dei gas prodotti della reazione:

$$S_f = S_u \cdot E$$

Dove:

S_f Velocità di fiamma

S_u Velocità di combustione

E Fattore di espansione volumetrica dei prodotti della combustione

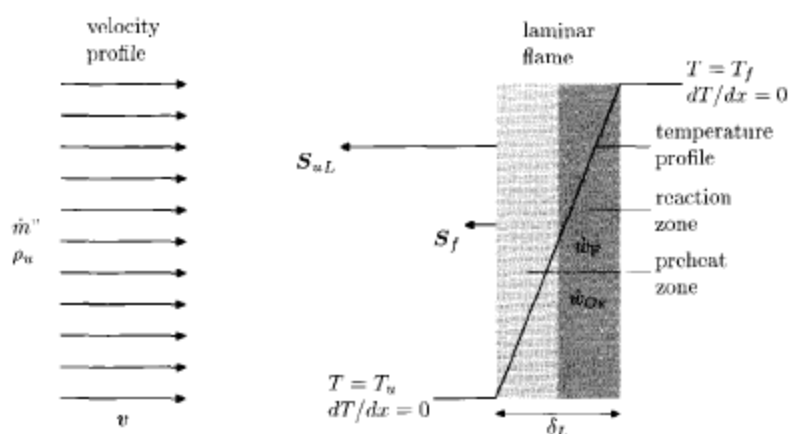



Figura 3.8- Struttura semplificata di una fiamma premiscelata laminare piana. La miscela incombusta si trova a sinistra.(fonte: Dahoe, A. E., Dust Explosions: a Study of Flame Propagation, Technische Universiteit Delft, 2000) S_f=velocità di fiamma; S_{uL}=Vel combustione laminare; δ_L= spessore della fiamma laminare= $S_{uL}\tau_C$ τ_C=tempo della reazione chimica

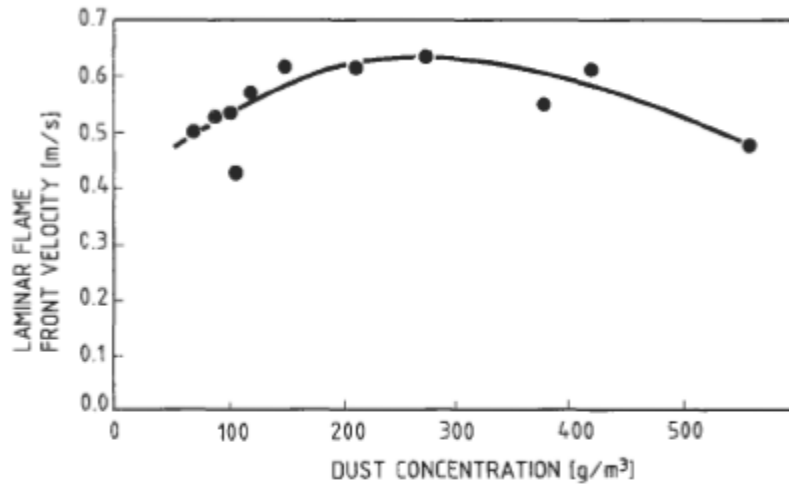



Figura 3.9 – Esempio di valori di velocità di combustione laminare di amido di mais in funzione della concentrazione della nube, ricavati da prove sperimentali di Proust e Veyssiere, 1988.

Nella Figura 3.10, abbiamo uno schema di fiamma turbolenta che si sta propagando da destra verso sinistra. In questa figura la fiamma è supposta ferma e c'è un flusso turbolento, che ha un profilo di velocità caratterizzato da una velocità quadratica media v'. Detta A_L la superficie del fronte di fiamma istantaneo, la portata in massa dei prodotti ancora incombusti (indicati con l'indice u=unburnt) è:

$$\dot{m} = \rho_u A_T S_{uT}$$

Indicando con $\dot{m}'' = \frac{\dot{m}}{A_T}$ la portata superficiale, definiamo la velocità di combustione turbolenta:

$$\boxed{S_{uT} = \frac{\dot{m}''}{\rho_u}}$$

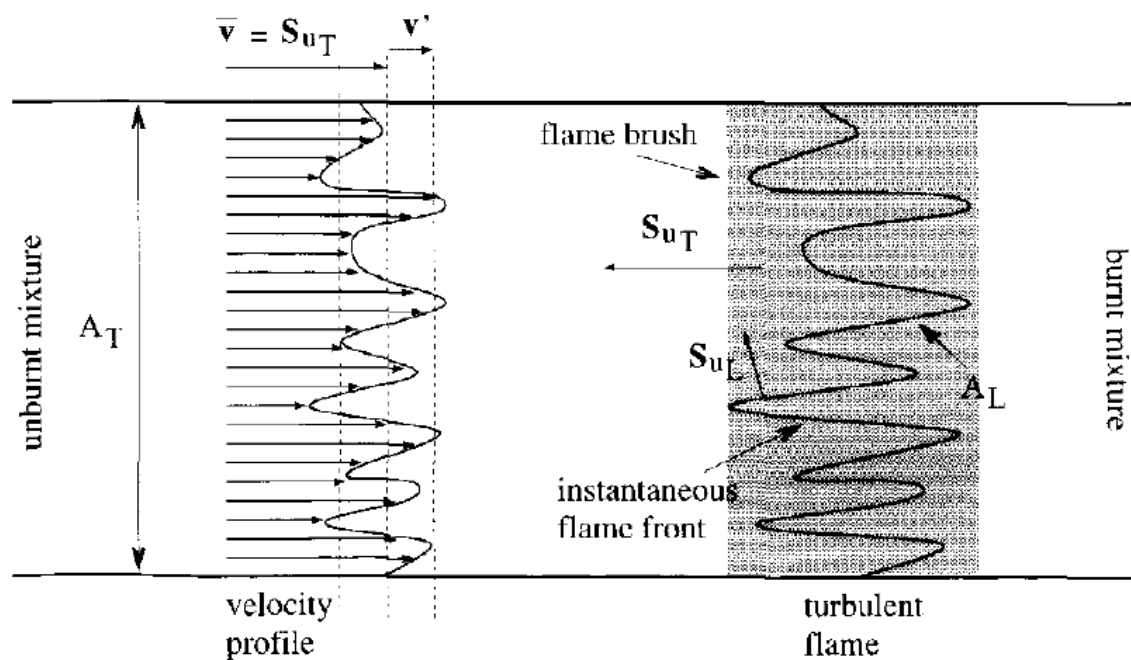



Figura 3.10 – Struttura semplificata di una fiamma premiscelata turbolenta piana. In questo caso si può parlare di un profilo medio della fiamma nel tempo (simile ai peli di un pennello che oscillano velocemente) e in questo modo possiamo parlare di una velocità turbolenta di combustione e uno spessore di fiamma turbolenta (zona grigio scuro).

3.4 RIEPILOGO DELLE SIMILITUDINI E DIFFERENZE TRA ESPLOSIONI DI POLVERI E QUELLE DI GAS

Il pericolo delle esplosioni di gas è stato studiato prima di quello delle esplosioni di polveri e quindi quest'ultimo è stato sviluppato sulla base delle conoscenze acquisite su tale fenomeno.

Una fondamentale differenza, a livello microscopico, tra una miscela di gas ed aria ed una nube di polvere combustibile ed aria è la diversa **disposizione spaziale** delle particelle. La seconda può essere considerata come delle particelle di polvere disperse nel continuo dell'aria: per esempio considerando una densità della polvere di 1000 kg m^{-3}, una dimensione delle particelle di 15 micron, e una concentrazione della miscela di 500 g m^{-3} c'è una distanza tra due particelle di polvere pari a 150 micron. Quindi la distanza interparticellare è di circa 10 volte la dimensione di una particella (Dahoe, Hanjalic, Scarlett 2002). Invece in un gas ideale, per definizione, il volume delle sue molecole è trascurabile rispetto al volume a disposizione dei gas e le interazioni fra le sue molecole sono anch'esse trascurabili (ordine di grandezza Angstrom). Quindi le proprietà microscopiche che determinano la velocità di combustione di una nube di polvere combustibile ed aria non possono essere considerate proprietà medie della nube di polvere. Tuttavia è stato dimostrato da Bradley e Lee (1984) che una nube di polvere presenta una velocità di combustione e uno spessore del fronte di fiamma simile a quello di una miscela di gas se, durante il processo di combustione e precisamente nella zona di preriscaldamento[n], le particelle di polvere sono in grado di produrre quantità sufficiente di sostanze volatili.

Poiché come hanno dimostrato CashDollar et al. (1988) nella combustione di polveri di organiche naturali, la fase di pirolisi/devolatilizzazione avviene sempre prima della combustione, che a sua volta avviene per lo più nella fase gassosa omogenea (fonte: Di Benedetto, A. and Russo, P., Thermo-kinetic modelling of dust explosions, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 20 (4-6), 303-309, 2007) la similitudine è rispettata.

[n] Una fiamma che si sta propagando presenta una zona di preriscaldamento che è "alimentata" dalla zona di reazione della fiamma (Drysdale , Introduction to fire dynamics (pag. 89)).

In sintesi, riguardo l'accensione e la combustione delle miscele di gas e delle nubi di polvere le proprietà simili sono:

- ✓ Limiti di infiammabilità/esplosività
- ✓ Velocità di combustione laminare e distanze di quenching
- ✓ Risposta della velocità di combustione alla turbolenza della nube
- ✓ Fenomeno della detonazione
- ✓ Pressioni di esplosione a volume costante adiabatica dello stesso ordine di grandezza;
- ✓ Energie di accensione minime ben definite;
- ✓ Temperature minime di accensione per condizioni sperimentali date.

Mentre i gas tendono ad occupare tutto il volume a loro disposizione, partendo dal basso se hanno una densità rispetto all'aria maggiore, dall'alto se sono più leggeri dell'aria; le polveri al contrario tendono a stratificare e a formare cumuli (= fattore peggiorativo per il rischio d'esplosione secondaria). Infatti per le polveri combustibili si può definire una velocità di sedimentazione (classificazione delle polveri in "sedimentanti" o "depositanti" a seconda del valore di tale velocità maggiore o minore di 10 m s^{-1}).

Altra differenza riguarda sulla maggiore pericolosità delle polveri: mentre le esplosioni di gas sono impossibili all'interno delle attrezzature di processo poiché esse contengono soltanto il combustibile, senza aria comburente, le esplosioni di polveri, in particolare quelle dette primarie, solitamente avvengono all'interno delle attrezzature di processo, poiché vi è presenza di aria e l'innesco può essere fornito anche da una scintilla.

Un'altra differenza è stata evidenziata da una prova sperimentale: una polvere di amido di mais dispersa in un flusso laminare d'aria mentre brucia affronta un ostacolo (sfera, anello, disco). Con l'anello si sono osservati dei fenomeni che tendono a spegnere la fiamma. La spiegazione è stata attribuita alla separazione delle particelle di polvere combustibile dall'aria nei vortici turbolenti intorno al disco dovuti alla forza centrifuga. Questa osservazione indica che la velocità di combustione di una nube di polvere combustibile ed aria non risponde alla turbolenza allo stesso modo in cui risponde la velocità di combustione di un gas premiscelato ([12]).

3.5 INFLUENZA DELLA TURBOLENZA SUI PARAMETRI DELL'ESPLOSIONE

Se si vuole controllare il pericolo delle esplosioni di polveri tramite le superfici di sfogo occorre caratterizzare lo specifico processo di esplosione, che dipende dall'attrezzatura, dalla polvere coinvolta, dalla sua concentrazione, dalla temperatura e dalla pressione che vi sono all'interno dell'impianto e soprattutto dalla turbolenza (fonte: Braithwaite – comunicazione privata con Dott. Dahoe). Infatti nelle attrezzature utilizzate per il trattamento delle polveri, la turbolenza presente nella nube di polvere è necessariamente indotta per vincere la tendenza a sedimentare della polvere. Invece, nel caso delle esplosioni secondarie la turbolenza è generata dalla propagazione della palla di fuoco nel "volume secondario".

Nello studio del moto dei fluidi, per turbolenza si intende un movimento relativo di due particelle qualsiasi di polvere nelle tre dimensioni spaziali x y z e variabile in termini statistici (Figura 3.11).

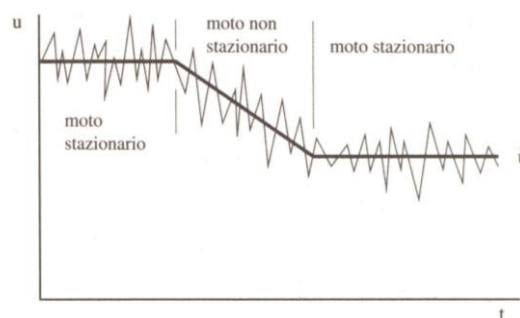



Figura 3.11 Grafico della velocità media e sovrapposto l'andamento irregolare della velocità delle particelle in una corrente turbolenta (fonte: Pnuelli, D. (1997) Il Moto dei fluidi, Zanichelli)

Una grandezza utilizzata per quantificare **l'intensità della turbolenza** in una nube di polvere dispersa in aria è di utilizzare la radice quadratica media della componente di velocità turbolenta (u'_{rms}), definita come l'intensità delle fluttuazioni di velocità rispetto ad un valore medio del flusso.

Invece un'altra grandezza che si riferisce alla geometria del flusso, è la **scala della turbolenza**, che è una misura media dei vortici che si formano nel flusso.

Di solito si è soliti distinguere tre livelli di turbolenza:

(1) Turbolenza caratterizzata da elevata scala (vortici che seguono la forma della geometria in cui il flusso è immerso)
(2) Turbolenza caratterizzata da media scala
(3) Turbolenza caratterizzata da piccola scala

Un modello matematico approssimativo ed utilizzato per descrivere la turbolenza è il modello κ - ε, dove κ è energia cinetica turbolenta ed ε è la derivata della quota di energia cinetica convertita in calore. Questo modello è stato utilizzato per studiare le esplosioni di polvere in condizioni di turbolenza programmando dei codici di calcolo con il computer.

Nel caso delle esplosioni di polveri combustibili, possiamo definire un **grado di turbolenza** come il rapporto tra la massima velocità di crescita della pressione ottenuta in condizioni di turbolenza e il corrispondente valore ottenuto in assenza di turbolenza.

La turbolenza ha un effetto amplificatore dei fenomeni di trasporto di quantità di moto, energia cinetica, calore e di specie reattive dovuto al rimescolamento che si produce nei vortici presenti nel fronte di fiamma. La velocità del trasporto è diversi ordini di grandezza più grande di quella dovuta alla diffusione molecolare (fonte: Tennekes, H. and Lumley, J. L., A first course in turbulence, 1972):

$$\frac{T_{turb}}{T_{mulecular}} \simeq \frac{1}{\mathrm{Re}} \simeq 0 \quad (se\ \ per\, esempio\, \mathrm{Re} = 15000)$$

$$\frac{k}{\gamma} \simeq \mathrm{Re}\ \ \text{dove K= diffisività turbolenta}$$

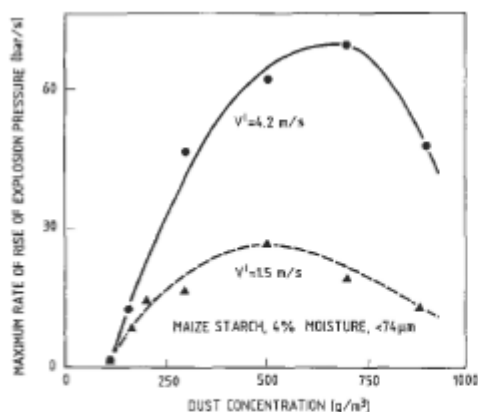



Figura 3.12 – Effetto della turbolenza sulla massima derivata della pressione in funzione della concentrazione della nube combustibile, per l'amido di mais con il 4% di umidità e diametro equivalente delle particelle di 74 μm.

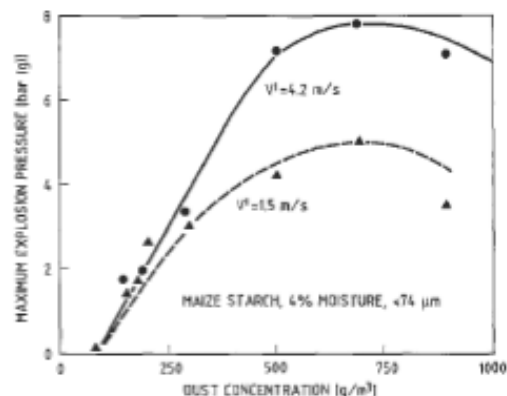



Figura 3.13 - Effetto della turbolenza sulla pressione massima in funzione della concentrazione della nube combustibile, per l'amido di mais con il 4% di umidità e diametro equivalente delle particelle di 74 μm.

Mentre per i gas la massima pressione ottenuta dalle prove in laboratorio può essere applicata alla realtà industriale senza correzioni (legge cubica esatta), poiché essa è indipendente dalle dimensioni della recipiente ed è indipendente dalla turbolenza, per le polveri non è sempre così. Infatti la pressione registrata durante un'esplosione aumenta all'aumentare della turbolenza (vedi Figura 3.15**Error! Reference source not found.**). Nonostante ciò si continua a seguire il comportamento dei gas, rispetto alla pressione massima, anche per le polveri poiché i livelli di turbolenza registrati durante le prove di laboratorio sono molto maggiori di quelli esistenti nel attrezzature industriali. Però questa considerazione porta in generale a stimare eccessivamente il pericolo dell'esplosione. Invece della turbolenza è generata dall'esplosione stessa la pressione massima raggiunta dall'esplosione è stimata in difetto dagli esperimenti di laboratorio.

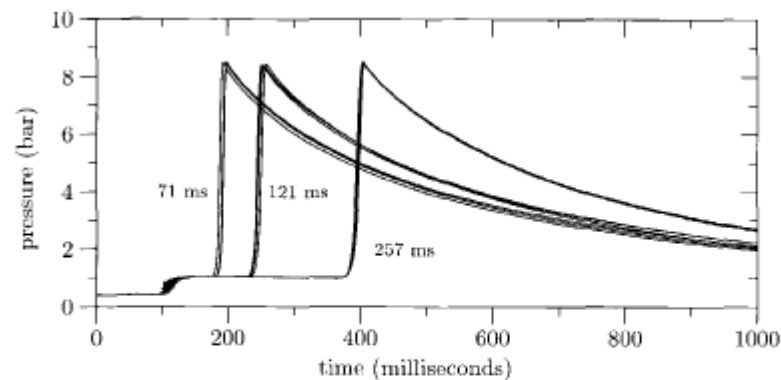



Figura 3.14 – Grafico della sovrapressione durante l'esplosione di una miscela di aria e metano in concentrazione stechiometrica e nel reattore sferico di 20l. Come si può osservare la p_{max} ed anche la derivata massima della pressione non sono funzione del tempo di ritardo dell'accensione e quindi non risentono del flusso turbolento della miscela.

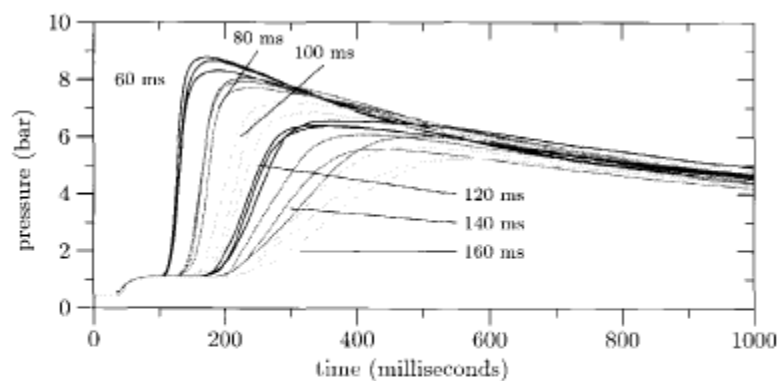



Figura 3.15 - Grafico della sovrapressione durante l'esplosione di una nube di amido di mais in concentrazione di 625 gm^{-3} nel reattore sferico di 20l. Come si può osservare la p_{max} ed anche la derivata massima della presisone sono funzione del tempo di ritardo dell'accensione e quindi risentono del flusso turbolento della nube.

Infine può essere utile classificare la turbolenza in base alla modalità in cui viene originata: la **turbolenza iniziale** dovuta al moto dentro l'attrezzatura industriale prima dell'innesco dell'esplosione e il secondo tipo **indotto dall'esplosione stessa** e dall'espansione dei gas combusti davanti al fronte di fiamma. Si genera turbolenza anche quando l'esplosione si propaga in presenza di ostacoli che la nube incontra. Anche la fuoriuscita dei prodotti incombusti e del fronte di fiamma dalle superficie di sfogo può provocare turbolenza dentro e fuori del volume protetto.

3.6 INFLUENZA DELLA TURBOLENZA SULLA PROPAGAZIONE DELL'ESPLOSIONE

Se la nube di polvere combustibile ed aria sta bruciando, la turbolenza provoca la miscelazione fra i prodotti caldi della combustione, le particelle che stanno bruciando e le parti non combuste. Quindi la nube diventa come una sovrapposizione nelle tre dimensioni di strati combusti, non combusti e freddi (moto laminare del fronte di fiamma → modello 2D; moto turbolento del fronte di fiamma→ modello 3D [13]).

La turbolenza provoca un aumento della superficie del fronte di fiamma, che a sua volta fa crescere i meccanismi di diffusione di massa ed energia, aumenta la velocità di reazione della combustione e quindi si ha un aumento, a volte consistente (anche di 10 volte) di MRPR ([20]):

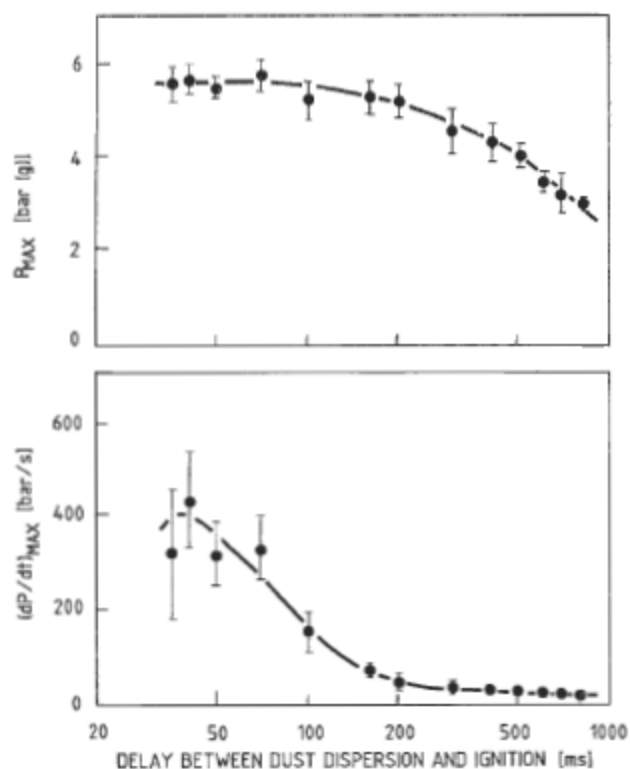



Figura 3.16 – Tipico andamento delle grandezze caratteristiche della violenza dell'esplosione in funzione della turbolenza. La polvere è licopodio[o] con concentrazione 420 g/m³ in un contenitore di prova di 1,2 l. Gli intervalli di incertezza dei valori misurati sono pari a ± 1 bar.

[o] È una pianta perenne, sempreverde a portamento strisciante La polvere di Lycopodium, ricavata dalle sue spore, è particolarmente infiammabile.

Questi grafici ci mostrano come la velocità di crescita della pressione diminuisca rapidamente, di almeno un ordine di grandezza. Questo effetto è dovuto alla rapida diminuzione della turbolenza nel reattore di prova. Invece la massima pressione di esplosione si conserva costante per un intervallo più ampio (sino intorno ai 200 ms) perché mentre quest'ultima è rappresentativa maggiormente delle proprietà termodinamiche della polvere combustibile, la velocità di crescita della pressione è in stretta relazione con gli aspetti cinetici chimici che caratterizzano la combustione.

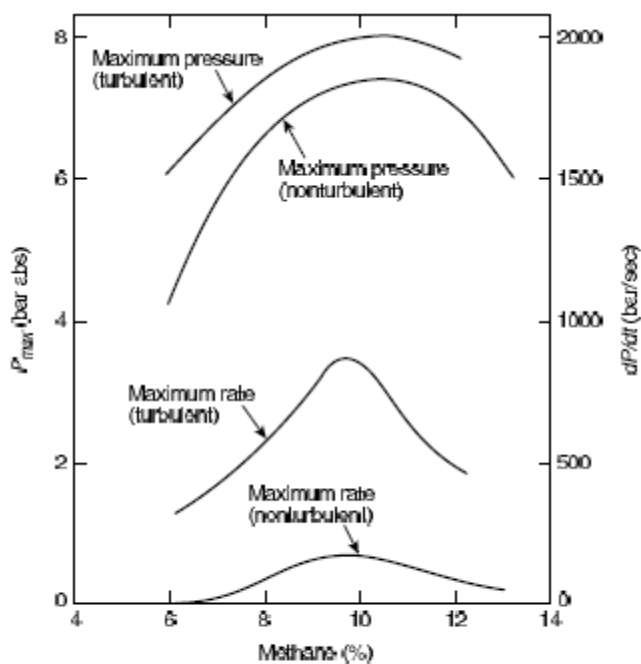



Figura 3.17 – Effetto della turbolenza su pMAx e MRPR per una miscela di metano ed aria. (Fonte: NFPA68-2007)

Il meccanismo di propagazione del fronte di fiamma in presenza di turbolenza è determinato dai vortici che si formano all'interno della nube di polvere e che agiscono come sorgenti di innesco aggiuntive. È chiaro che una nube con turbolenza brucia molto più velocemente di una nube senza alcuna velocità media entro la quale il fronte di fiamma si propaga con una superficie piana. L'altra faccia della medaglia è che l'accensione di una nube turbolenta richiede una maggiore energia della stessa nube in condizioni statiche ([13]).

Generalmente piccoli valori di intensità di turbolenza e grandi scale di turbolenza in confronto allo spessore della fiamma producono fiamme fortemente raggrinzate (wrinkled flame) ma i fenomeni di trasporto rimangono invariati. Invece quando invece la turbolenza del flusso a monte della fiamma aumenta (grandi intensità di turbolenza) e la misura media dei vortici diventa piccola, i vortici hanno l'effetto di far aumentae il fronte di fiamma e la velocità di propagazione.

Quando in un condotto avviene una deflagrazione, e se sorge della turbolenza nel fronte di fiamma, può generarsi un'onda d'urto che condusse ad una detonazione (Deflagration to Detonation Transition = DDT) perché può formarsi un meccanismo con un **anello di feedback positivo**.

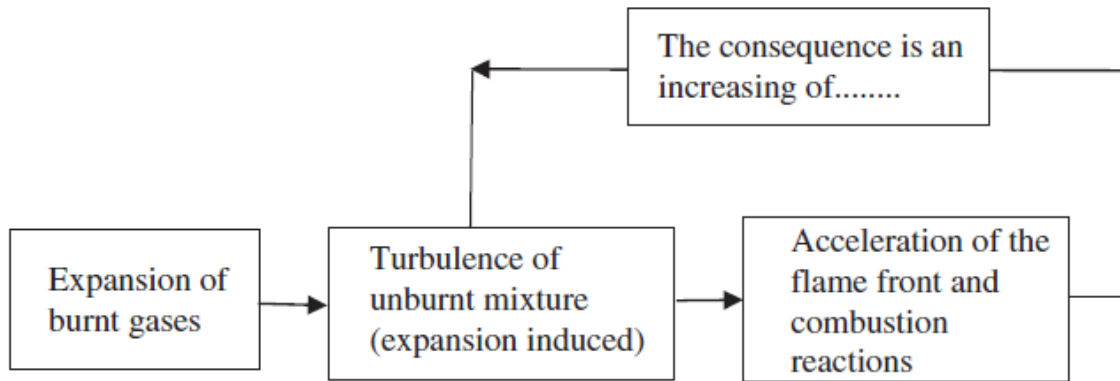



Figura 3.18 – Schema del fenomeno della transizione da deflagrazione a detonazione con la formazione di un'accelerazione del fronte di fiamma e dell'onda di pressione dovuta alla turbolenza. (fonte: Silvestrini, M. and Genova, B., Correlations for flame speed and explosion overpressure of dust clouds inside industrial enclosures, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008; insirato da: Bjektvedt et al. 1997).

3.7 COMBUSTIONE TURBOLENTA DELLE POLVERI ORGANICHE NATURALI

Lo studio della combustione turbolenta è condotto utilizzando un apparato sperimentale il cui schema di principio è riportato nella figura seguente:

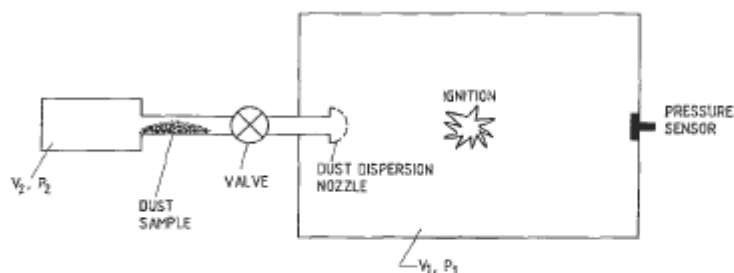



Figura 3.19 – Apparato sperimentale comunemente utilizzato per gli esperimenti sulla combustione turbolenta in recipienti chiusi. Il volume V_1 massimo sperimentato è stato 250 m³ - P_2 >> P_1.

Prima di innescare la miscela, si provvede a ristabilire la pressione atmosferica, perché la pressione iniziale, influenza la pressione massima raggiunta e l'andamento della crescita della pressione durante l'esplosione.

La turbolenza all'interno del contenitore di prova raggiunge rapidamente un massimo subito dipo l'inizio della dispersione e poi inizia a decrescere e si annulla quando la dispersione è completata; tale andamento è mostrato in figura:

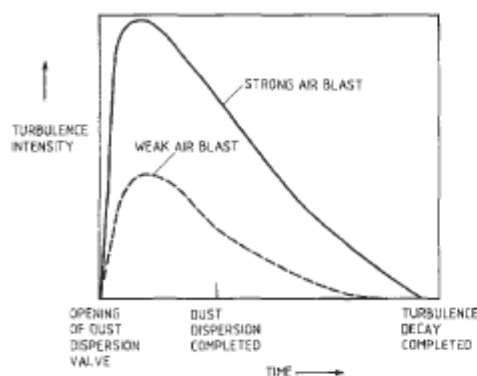



Figura 3.20 – Decadimento temporale della turbolanza all'interno del contenitore di prova. Dopo aver raggiunto il massimo, poco prima della fine della dispersione dell nube nel contenitore, la turbolenza diminuisce e la polvere combustibile tende a sedimentare. L'intensità di turbolenza è rappresentata dal valore quadratico medio della velocità turbolenta.

Dalle prove eseguite si è studiata l'influenza della turbolenza sui due parametri più importanti della gravità dell'esplosione: la p_{MAX} e $\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX}$ agendo sul ritardo dell'innesco all'interno del contenitore di prova dall'inizio della dispersione della polvere combustibile.

Possiamo osservare nella Figura 3.21 che nell'intervallo da 0,3 s fino a 1 s la velocità di crescita della pressione diminuisce rapidamente, mentre invece la p_{MAX} rimane sostanzialmente costante per tutte e due le polveri in prova (Alluminio e Carbone). Per tempi di ritardo dell'innesco oltre 1 s vi è anche la diminuzione di p_{MAX} del Carbone. Il tempo di ritardo di 0,6 s, stabilito dallo standard ISO 6184 Part 1 non rappresenta il caso peggiore, che invece si ha all'istante 0,3 s.

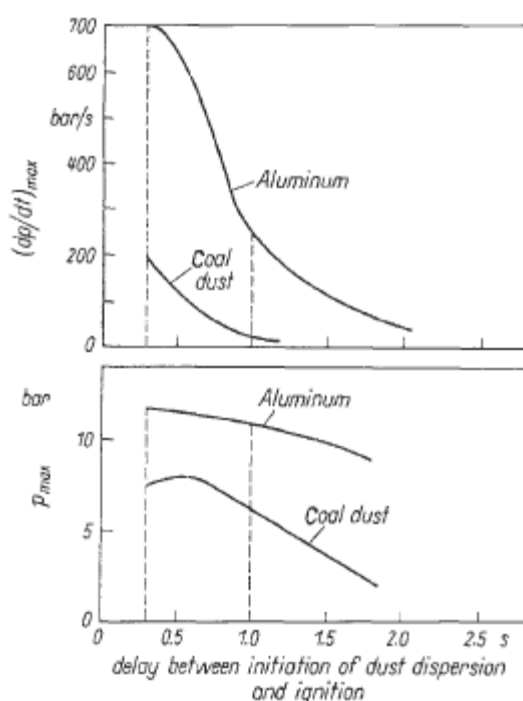



Figura 3.21 – Risultati di esperimenti di combustione turbolenta di polvere di Al e polvere di carbone in un contenitore chiuso da 1 m^3 (Bartknecht, 1971).

In altre prove è stata misurata l'intensità della turbolenza per una nube di amido di mais ed aria. I risultati hanno mostrato un'importante incidenza della turbolenza sia sull'andamento della p_{MAX} che su $\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX}$. In questo esperimento, il volume della sfera di prova è 0,95 m^3 e il meccanismo di dispersione della polvere è migliore di quello riportato nella Figura 3.19 perché permette di ottenere una dispersione, e quindi una turbolenza, più uniforme in tutto il volume di prova. Il valore di turbolenza è stato misurato con un anemometro a filo riscaldato.

BIBLIOGRAFIA DI SEZIONE

[1] Amyotte, P., Chippett, S., and Pegg, M. (1988). "Effects of turbulence on dust explosions." PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE, 14(4), 293-310.

[2] Bielert, U. S. M. (1999). "Numerical simulation of dust explosions in pneumatic conveyors." Shock waves, 9, 125-139.

[3] Bozier, O., and VeyssiÃ¨re, B. (2006). "INFLUENCE OF SUSPENSION GENERATION ON DUST EXPLOSION PARAMETERS." Combustion Science and Technology, 178(10), 1927 - 1955.

[4] Bradley, D., Lawes, M., Scott, M. J., and Mushi, E. M. J. (1994). "Afterburning in Spherical Premixed Turbulent Explosions." Combustion and flames, 99, 581-590.

[5] Bradley, D., and Lee, J. H. S. (Year). "Burning rates in turbulent fine dust air explosions." First International Colloquium on the explosibility of industrial dusts, 220-223.

[6] Bradshaw, P. (1997). "Understanding and predistion of turbulent flow." International Journal of heat and fluid flow, 18, 45-54.

[7] Cashdollar, K. (2000). "Overview of dust explosibility characteristics." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 183-199.

[8] Dahoe, A. E. (2000). "Dust Explosions: a Study of Flame Propagation," Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft.

[9] Dahoe, A. E. a. b. K. H. c. a. B. S. a. (2002). "Determination of the laminar burning velocity and the Markstein length of powder–air flames." Powder Technology, 122(2-3), 222-238.

[10] Dahoe, A. E. L. P. H. d. G. (2003). "On the determination of the laminar burning velocity from closed vesselnext term gas explosions." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 16(6), 457-478.

[11] Dobashi, R., and Senda, K. (2006). "Detailed analysis of flame propagation during dust explosions by UV band observations." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, 149-153.

[12] Drysdale, D. (1999). An introduction to fire dynamics, Edinburgh.

[13] Eckhoff, R. K. (2003). "Propagation of Flames in Dust Clouds." In: Dust Explosions in the Process Industries, ELSEVIER, ed., 251-384.

[14] Jarosinski, J., Podfilipski, J., and Pu , Y. (2000). "Visualization of Dust Explosion Under Microgravity Conditions " Combustion Science and Technology, 158(1 September 2000), 183-194

[15] Karlovitz, B., Denniston, D. W., Wells, J., and Wells, F. E. (1951). "Investigation of turbulent flames." Turbulent flames, 19(5).

[16] Krause, U., and Kasch, T. (2000). "The influence of flow and turbulence on flame propagation through dust-air mixtures." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13(3-5), 291-298.

[17] Nagy, J., Conn, J. W., and Verakis, H. C. (1969). "Explosion Development in a spherical vessel." U.S. Department of Interior Bureau of mines, Washington.

[18] Quintiere, J. G., and Karlsson, B. (2000). Enclosure fire dynamics.

[19] Silvestrini, M. Genova., B.; Simonetti. "Studio degli effetti delle esplosioni di gas." Ministero dell'Interno - Dipartimento dei Vigili del Fuoco.

[20] Silvestrini, M. Genova., B.; (2008) Direttive ATEX. Flaccovio editore

[21] Silvestrini, M. Genova, B. (2008). "Correlations for flame speed and explosion overpressure of dust clouds inside industrial enclosures." Journal of Loss Prevention in the Process Industries.

[22] Suna, J. a., Dobashi, R. b., Hirano, T. c., (a) State Key Laboratory of Fire Science, U. o. S. a. T. o. C., Hefei, Anhui 230026, PR China, (b) Department of Chemical System Engineering, S. o. E., The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan, and (c) Chiba Institute of Science, S.-c. C.-s. C.-., Japan (2006). "Structure of flames propagating through aluminum particles cloud and combustion process of particles." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(6), 769-773.

[23] Van Der Wel, P. G. J. (1993). "Ignition and propagation of dust explosions," Delft University of Technology, Delft.

[24] Van Wingerden, K., Pedersen, G. H., and Wilkins, B. A. (Year). "Turbulent flame propagation in gas mixtures." Hazard XII Institution of chemical engineers (Great Britain).

[25] Peters, N. (2000). Turbulent Combustion.

[26] Snegirev, A. Y., Makhviladze, G. M., Talalov, V. A., and Shamshin, A. V. (2003). "Turbulent diffusion combustion under conditions of limited ventilation: flame

projection through an opening." Combustion, Explosion and Shock waves, 39(1), 1-10.

[27] Tamanini, F. (1990). "Turbulence effects on dust explosion venting." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 9(1), 52-60.

[28] Tamanini, F. (1998). "The role of turbulence in dust explosions." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 11(1), 1-10.

[29] Tennekes, H., and Lumley, J. L. (1972). A first course in turbulence.

[30] Oberlack, M., Khujadze, G., Gunther, S., Weller, T., Frewer, M., Peinke, J., and Barth, S. (Year). "Progress in turbulence II." iTi Conference in turbulence, Springer.

[31] Peters, N. (2000). Turbulent Combustion.

[32] Pope, S. Turbulent flows, Cambridge University Press.

[33] Snegirev, A. Y., Makhviladze, G. M., Talalov, V. A., and Shamshin, A. V. (2003). "Turbulent diffusion combustion under conditions of limited ventilation: flame projection through an opening." Combustion, Explosion and Shock waves, 39(1), 1-10.

[34] Tamanini, F. (1990). "Turbulence effects on dust explosion venting." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 9(1), 52-60.

[35] Tamanini, F. (1998). "The role of turbulence in dust explosions." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 11(1), 1-10.

[36] Tennekes, H., and Lumley, J. L. (1972). A first course in turbulence.

[37] Van Wingerden, K., Pedersen, G. H., and Wilkins, B. A. (Year). "Turbulent flame propagation in gas mixtures." Hazard XII Institution of chemical engineers (Great Britain).

[38] Zalosh, R. (2007). "New dust explosion venting design requirements for turbulent operating conditions." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 20(Issues 4-6), 530-535.

[39] Zhen, G., and Leuckel, W. (1996). "Determination of Dust-Dispersion-lnduced Turbulence and its Influence on Dust Explosions." Combustion Science and Technology, 113(1), 629 - 639.

CAPITOLO 4

PROTEZIONE DI AMBIENTI CONFINATI E CONTENITORI CON SUPERFICI DI SFOGO

4.1 PREVENZIONE E PROTEZIONE DALLE ESPLOSIONI

Un'esplosione di polveri combustibili disperse in aria, considerata un pericolo dannoso che vogliamo evitare, è causata da una catena di eventi. La valutazione E la riduzione del rischio d'esplosione di polveri possono essere condotte con la prospettiva di interrompere questa catena di eventi incidentali. L'analisi dell'albero dei guasti (Fult tree analysis=FTA) è una metodologia che, partendo dal top event che si vuole studiare giunge agli eventi elementari (analisi up-down). L'albero si risale, verso il top event, attraverso le combinazioni degli eventi elementari che devono accadere contemporaneamente (porta logica AND) oppure separatamente (porta logica OR). Nella figura sottostante è rappresentato un esempio di FTA applicato ad un deposito di cereali in silos con impianto di sollevamento:

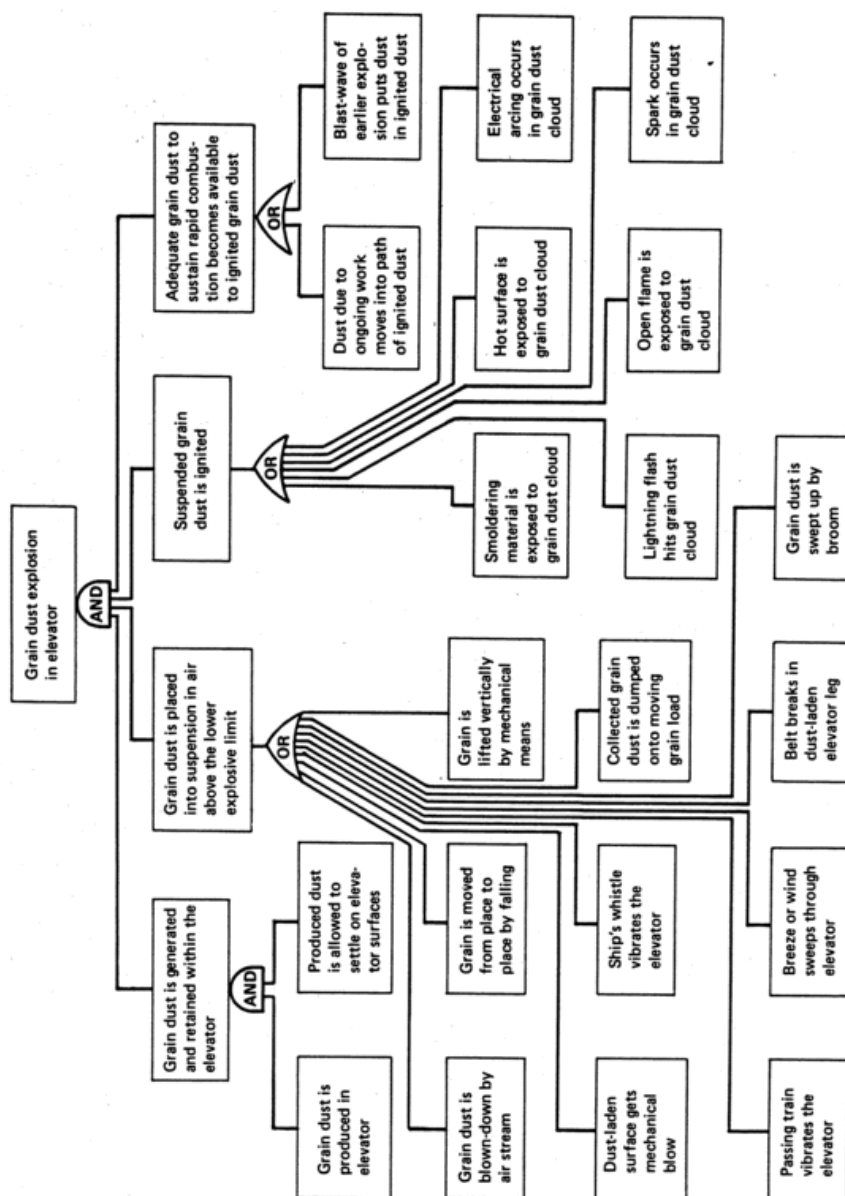



Figura 4.1 – Esempio di FTA applicata a dun deposito di cereali con impianto di sollevamento.

I concetti ingegneristici più avanzati sulla sicurezza sul lavoro sono:

(1) il Sistema continuo di miglioramento della sicurezza, che, ad esempio si realizza nel Sistema di gestione della sicurezza per le attività soggette al controllo secondo l'art. 8 del D.Lgs 334/1999 modificato dal D.Lgs. 238/2005 sui rischi d'incidente rilevante.

(2) Inherent safety (enunciata per la prima volta da T. Kletz, 1999): è un approccio alla sicurezza di tipo proattivo, cioè consistente nel progettare un processo teso a minimizzare le fonti di pericolo (Tabella 4-1).

Principle	Definition
Intensification	Reduction in the quantity of hazardous materials
Substitution	Use of safer materials
Attenuation	Running equipment at safer operating conditions, such as room temperature and pressure, and in liquid phase
Limitation of effects	Changing equipment design and operation for less-severe effects, such as unit segregation
Simplification	Avoidance of multi-product or multi-unit operations, or congested pipe or unit settings
Error tolerance	More robust equipment, processes that can bear upsets, reactors able to withstand unwanted side reactions, etc.
Avoid knock-on effects	Ample layout spacing, fail-safe shut down, open construction
Prevent incorrect assembly	Unique valve or piping systems to reduce human error
Clarrify equipment status	Avoidance of complicated equipment and information overloading
Ease of control	Less hands-on control

Tabella 4-1 Principi dell'inherent safety espressi da T. Kletz (1999)

Nel progettare la sicurezza sul lavoro di ogni attività antropica, sappiamo che la riduzione del rischio attraverso l'approccio preventivo rappresenta la sicurezza primaria di base (riduzione della probabilità dell'evento pericoloso) e che le misure di protezione (riduzione degli effetti dell'esplosione) rappresentano la sicurezza complementare. Nella Tabella 4-2 sono riassunte le misure di sicurezza applicabili:

MISURE DI PREVENZIONE DELL'ESPLOSIONE		**MISURE DI PROTEZIONE (MITIGAZIONE) DELL'ESPLOSIONE**
Prevenire la formazione della nube di polvere combustibile ed aria	**Prevenire la presenza di sorgenti di accensione**	
Progettazione del processo tesa a prevenire la formazione indesiderata di nubi di polvere e la segregazione delle particelle (inherent safety)	Fenomeni di combustione covante negli strati di polvere, incendi di nubi di polvere	Costruzioni esistenti alla pressione di esplosione
Auto-inertizzazione della nube di polvere con il gas della combustione	Altri tipi di fiamme, per esempio lavori caldo	Sezionamento
Inertizzazione della nube di polvere con polvere inerte o umidità	Superfici calde (riscaldate elettricamente, meccanicamente o termicamente)	Superficie di sfogo
Mantenere la concentrazione di polvere fuori dall'intervallo di esplosività	Calore prodotto da urti meccanici (scintille e hot spots[p])	Impianti di soppressione automatica dell'esplosione
Inertizzazione della nube di polvere per mezzo di N_2, CO_2	Scintille elettriche, archi elettrici e cariche elettrostatiche	Inertizzazione con gas inerte
		Adeguata igiene industriale (pulizia della polvere)
		Protezione degli edifici (distanze di sicurezza; unità a rischio di esplosione nei piani alti o addirittura sul tetto).

Tabella 4-2 Quadro delle misure di prevenzione e di mitigazione dell'esplosione (ripreso ed ampliato da R. Eckhoff)

[p] Letteralmente macchia calda: è una porzione della superficie di un corpo che si scalda in seguito ad un urto, simbolo ripetuto, o in conseguenza dell'attrito con un altro corpo

4.2 GENERALITÀ SUI SISTEMI DI PROTEZIONE CON SUPERFICI DI SFOGO

Il progetto di un'attrezzatura o di una struttura in cui c'è probabilità che possa avvenire un'esplosione di polvere deve tener conto anzitutto delle dimensioni e della resistenza del contenitore, del tipo (dimensione e forma delle particelle di polvere) e della concentrazione del combustibile e del comburente in esso contenuti, la pressione e la temperatura iniziali, la turbolenza, la presenza dell'energia delle fonti di innesco e delle misure di sicurezza che si vuole adottare. Inoltre il progetto deve considerare anche le misure di sicurezza che abbiamo visto.

Tra le misure di protezione, le superfici di sfogo (in inglese questa tecnica di protezione è definita explosion venting) sono il mezzo di protezione utilizzato più comunemente perché sufficientemente sicuro ed economicamente praticabile.

La superficie di sfogo è un'apertura in un contenitore o in una struttura, attraverso la quale fuoriescono durante un'esplosione i prodotti della combustione, il gas le particelle di polvere. In genere quest'apertura è munita di un sistema di chiusura vincolato alla struttura circostante con scarsa o con grande resistenza meccanica. Durante l'esplosione questo sistemi di chiusura si rompe o si apre come una porta, rimanendo vincolato, o è salta lontano.

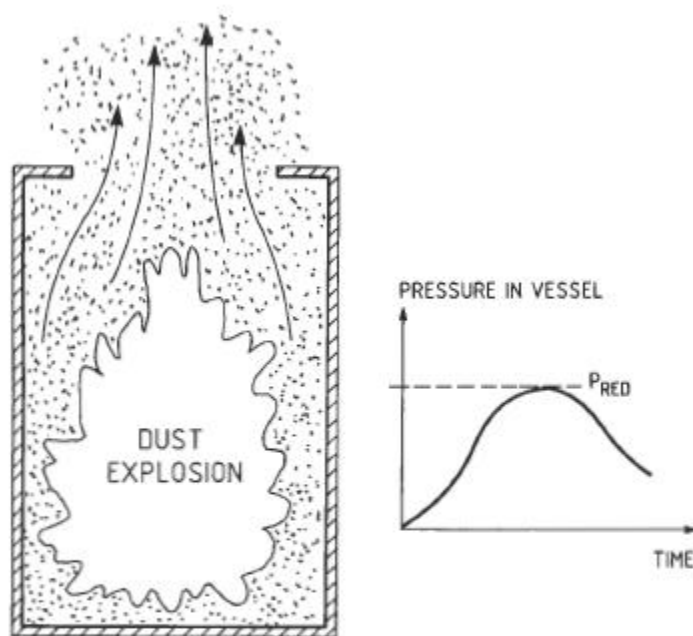



Figura 4.2 – Principio di funzionamento del venting: la fuoriuscita dei gas caldi e dei prodotti della combustione e della polvere incombusta dall'apertura consente di mantenere la pressione massima all'interno del contenitore al di sotto del valore di progetto p_{RED}.

Una superficie di sfogo consente di:

- Limitare la pressione interna del contenitore protetto;
- Far fuoriuscire la fiamma, i fumi e i gas caldi all'aperto;
- Rendere i minimi i danni alle persone e alle attrezzature all'interno del volume protetto.

Il progetto degli sfoghi di pressione deve considerare: la forma del contenitore da proteggere, la posizione delle attrezzature rispetto allo sfogo, la posizione delle probabili sorgenti d'accensione e la forma e dall'inerzia del sistema di chiusura scelto. Per esempio un volume stretto e allungato può aver bisogno di diverse superficie di sfogo mentre in un volume sferico può esser sufficiente un solo sfogo. La posizione e l'intensità della sorgente di accensione può influenzare la velocità di crescita della pressione anche di otto volte e la pressione massima raggiunta durante un'esplosione anche di quattro volte, a seconda della forma e delle dimensioni del volume. Un altro fattore da tenere in considerazione nel dimensionamento delle superfici di sfogo è la velocità della combustione che si può prevedere in caso di esplosione nel volume da proteggere: infatti a parità di superficie di sfogo, maggiore è la velocità di combustione, più elevata sarà la sovrapressione raggiunta all'interno del contenitore. Quindi maggiori velocità di combustione necessitano di maggiori superfici di sfogo:

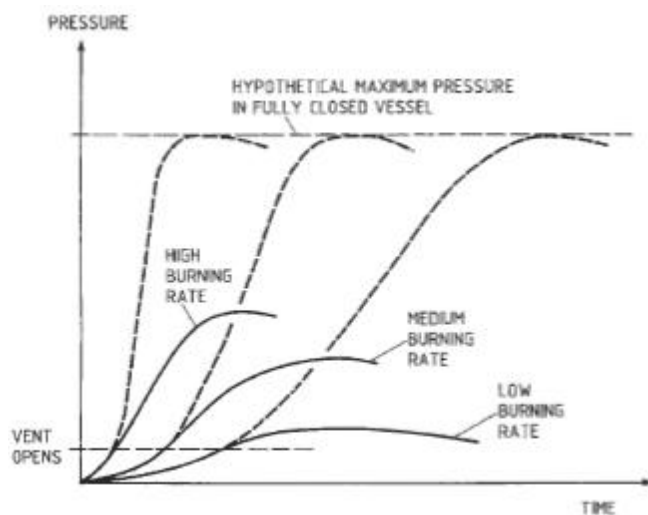



Figura 4.3 – Influenza della velocità di combustione (ottenute con un diverso grado di turbolenza e con una dispersione diversa) sulla crescita della pressione.

Sappiamo che in un'esplosione di polvere il **livello di turbolenza** influenza la sovrapressione che si sviluppa durante l'esplosione. Quindi è anch'esso un dato di cui tener conto durante il progetto degli sfoghi. Attualmente si tiene conto dell'intensità di turbolenza nel dimensionamento degli sfoghi indirettamente: infatti le formule utilizzate nelle norme NFPA, VDI ed EN per il dimensionamento degli sfoghi sono formulate e validate su esperimenti nei quali non è misurata la turbolenza o è stata fissata ad un valore stabilito.

Perciò per tener conto della turbolenza presente nell'ambiente da proteggere, condizione peggiorativa, si calcola un'area aggiuntiva o un'area maggiorata rispetto a quella senza turbolenza.

L'intensità della turbolenza è un fattore importante soprattutto quando si verifica un'esplosione secondaria, perché sia la turbolenza iniziale preesistente all'innesco, che quella indotta dall'esplosione primaria, che quella generata dagli ostacoli, determinano pesantemente la gravità dell'esplosione (p_{MAX} e $\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX}$).

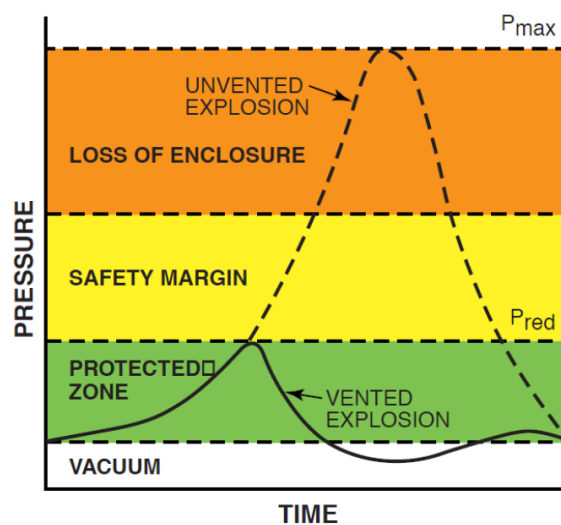



Figura 4.4 Rappresentazione schematica della protezione data dal venting: con la linea tratteggiata è rappresentato l'andamento della pressione senza superficie di sfogo, con la linea continua l'andamento della pressione con protezione. Lo sfogo è efficace quando mantiene la pressione residua al di sotto del valore che delimita superiormente la fascia verde. (fonte: Zook – Explosion Protection Vent Panels Documentation)

Nel meccanismo del venting le grandezze principali sono:

Simbolo[bar]	Italiano (Inglese)	Definizione
p_{MAX}	Pressione massima (Maximum pressure)	È la pressione che si svilupperebbe nel contenitore senza le superfici di sfogo durante l'esplosione di una miscela di polvere combustibile ed aria con "concentrazione ottimale".
p_{RED}	Pressione ridotta (Reduced pressure)	È la massima pressione raggiunta nel contenitore protetto con le superfici di sfogo, durante l'esplosione. **È un dato progettuale** **< p resistenza contenitore**
p_{STAT}	Pressione d'attivazione (Static pressure)	È la pressione necessaria all'attivazione delle superfici di sfogo con un incremento di pressione minore o uguale a 0.1 bar/min. Tiene conto dell' inerzia (massa) delle superfici di sfogo
p_{ES}	Resistenza meccanica della struttura (Enclosure Strenght)	Per le strutture a bassa resistenza può essere al massimo il valore dei 2/3 della pressione che determina il cedimento dell'elemento più debole della struttura; per le strutture al alta resistenza, è il valore di p_{RED}
	Area specifica degli sfoghi	È il rapporto tra l'area totale degli sfoghi (m^2) e il volume del contenitore (m^3)

Tabella 4-3 – Definizioni secondo NFPA68-2007

La pressione massima che il volume da proteggere può sopportare è quella delle parti strutturali (in questo caso il venting è utilizzato solo in piccoli volumi, dato il costo economico di strutture resistenti ad elevate pressioni) oppure quella di parti con bassa resistenza (parti cedevoli).

Il deflusso dei gas caldi all'esterno dell'involucro è il fenomeno antagonista di quello dell'espansione dei prodotti caldi della combustione. In un venting ben dimensionato il bilancio tra questi due flussi deve essere dimensionato per non oltrepassare il livello stabilito p_{red} (Figura 4.4).

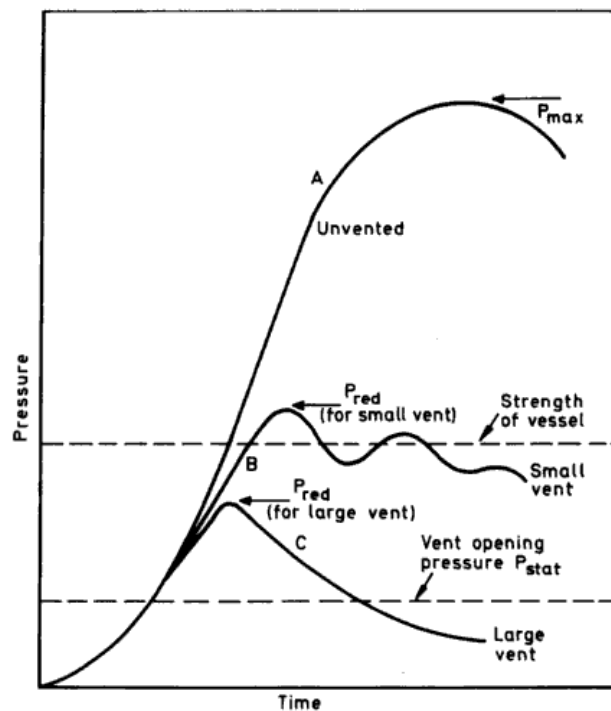



Figura 4.5 – Tipico andamento della sovrapressione durante un'esplosione senza superfici di sfogo (A) e di una con superficie di sfogo, ma inefficace (B) poiché il limite di resistenza del contenitore (strength of vessel) viene oltrpassato; la curva C rappresenta la "pressure time history" di un "venting" efficace. Fonte:John Barton – Dust explosion prevention and protection a practical guide.

Per le attrezzature allungate, tipo i silos, si può definire un **coefficiente caratteristico dello sfogo**, dato dal rapporto tra la sezione trasversale massima dell'attrezzatura e la superficie di sfogo dell'attrezzatura stessa:

$$K_{vent} = \frac{A_{top}}{A_{vent}}$$

4.3 NORME TECNICHE N.F.P.A., V.D.I. E U.N.I. C.E.N. PER IL DIMENSIONAMENTO DEGLI SFOGHI

Adesso saranno presentate le norme tecniche sul dimensionamento degli sfoghi più utilizzate in Europa e negli Stati Uniti:

- Norma dell'americana National Fire Protecion Association: NFPA 68-2007
- Norma della Verein Deutscher Ingenieure tedesca: VDI 3673-2002;
- Norma del Comitato europeo di normazione, recepita in Italia dall'Ente italiano di normazione, UNI EN 14491:2006.

È bene ricordare che esistono anche altre norme tecniche per il dimensionamento degli sfoghi. Tra queste si ricorda la norma della Factory Mutual Corporation, multinazionale di assicurazione delle aziende contro i rischi industriali, che è stata studiata in modo approfondito dal ricercatore Tamanini, e le norme scandinave. Invece nel Regno Unito si applica la norma europea.

4.3.1 NFPA 68 – 2007

Questa nuova versione, intitolata "Norma tecnica sulla protezione dall'esplosione per mezzo di superfici di sfogo" ("Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting"), sostituisce la precedente del 2002. Fino allora questa norma era stata una "guideline", cioè una norma volontaria. Invece adesso essa contiene dei requisiti obbligatori (cui si fa riferimento attraverso il verbo anglosassone: shall) che sono richiesti nella progettazione uso e manutenzione delle attrezzature che hanno lo scopo di offrire sfogo ai gas e alla pressione generata dalla deflagrazione. Il controllo del rispetto delle prescrizioni spetta all'Organizzazione per la sicurezza e la salute sul lavoro[q] del Dipartimento del Lavoro e alle autorita locali aventi giurisdizione nei singoli Stati.

Un'altra novità di questa nuova norma tecnica è l'introduzione della possibilità di progettazione degli sfoghi basata su criteri ingegneristici sviluppati in base al risultato che si vuol ottenere (performance-based design[r]). Inoltre le correlazioni sperimentali utilizzate nella norma sono state riviste alla luce di dati sperimentali aggiuntivi. È stato anche introdotto un nuovo capitolo destinato alla manutenzione dei dispositivi di sfogo.

L'indice di esplosività k_{st} utilizzato nele formule seguenti deve essere determinato attraverso la prova condotta secondo ASTM E 1226 (Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts) oppure con la ISO 6184-1:1985 (Explosion protection systems -- Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air).

La massima pressione sviluppabile all'interno del contenitore protetto con le superfici di sfogo non dovrà eccedere la resistenza meccanica delle strutture tenuto conto del fattore di carico dinamico (DLF): $p_{RED} \leq p_{es} / DLF$.

Dove $DLF = X_m / X_s$, rapporto tra la freccia massima in condizioni dinamiche (carico periodico variabile nel tempo) e la freccia statica, e serve a tener conto del contraccolpo sulla struttura (reazione dinamica) dovuto all'azione dell'esplosione.

[q] Sito internet: www.osha.gov. Recentemente è stato predisposta una dichiarazione di intenti per prevenire il pericolo delle esplosioni di polvere (Combustible Dust Explosion and Fire Prevention Act of 2008).

[r] In Italia, questo tipo di approccio alla progettazione della sicurezza antincendio (denominato Fire safety Enginering) per alcune attività soggette al controllo dei Vigili del Fuoco ai sensi del D.M.I. 16.02.1982, è stato introdotto con il D.M.I. 09.05.2007.

I contenitori con volume piccolo e relativamente simmetrico possono essere protetti da una superficie di sfogo unica oppure, con la stessa efficacia, da più superfici aventi come somma la stessa area. Invece per grandi volumi, occorre distribuire le superfici di sfogo nel modo più uniforme possibile.

Per determinare la superficie di sfogo richiesta per i contenitori che possono essere protetti con l'apertura soltanto da un'estremità (per esempio i silos), occorre calcolare la sezione trasversale del contenitore:

L e D si determinano in base alla forma generale e alla posizione stabilita o obbligata per lo sfogo.

H = è la distanza massima percorribile dalla fiamma

V_{eff} = volume effettivo del contenitore: è quel volume attraverso cui si può muovere la fiama mentre percorre la distanza H (i volumi occupati dal filtri, sacchetti contenuti all'interno devono essere trascurati o meno aseconda della disposizione di essi)

$A_{eff} = V_{eff}/H$ Area effettiva

$D_{he} = 4 \cdot \left(\frac{A_{eff}}{p} \right)$ Diametro idraulico effettivo, dove p è il perimetro della sezione trasversale del contenitore.

Le grandezze sopra elencate servono a definire il seguente fattore geometrico del contenitore:

$$\boxed{\frac{L}{D} = \frac{H}{D_{he}}}$$

Le condizioni di applicabilità della formula generale sono le seguenti:

(1) Pressione iniziale all'interno del volume, precedente all'accensione minore od uguale a $1 \pm 0{,}2$ bar
(2) $5 \text{ bar} \le p_{MAX} \le 12 \text{ bar}$
(3) $0{,}1 \text{ m}^3 \le V \le 10000 \text{ m}^3$
(4) $p_{stat} \le 0{,}75$ bar
(5) $L/D < 6$

La formula generale per il dimensionamento della superficie totale di sfogo è:

$$A_{v0} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 1,54 \cdot p_{stat}^{4/3}) \cdot k_{st} \cdot V^{3/4} \cdot \sqrt{\frac{p_{MAX}}{p_{red}} - 1}$$ dove:

A_{v0}	Area di sfogo richiesta [m²]
p_{stat}	Pressione di attivazione dei sistemi di chiusura di sfogo [bar]
p_{MAX}	Pressione massima di esplosione [bar]
p_{red}	Pressione ridotta all'interno del volume [bar]
V	Volume da proteggere [m³]
k_{st}	Indice di esplosività della polvere [bar m s⁻¹]

Se le componenti di velocità dell'aria tangenziale e assiale sono inferiori a 20 m/s , il calcolo dell'area i sfogo se $L/D > 2$ è:

$$A_{v1} = A_{v0}\left[1 + 0,6 \cdot \left(\frac{L}{D} - 2\right)^{0,75} \cdot \exp\left(-0,95 \cdot p_{red}^{2}\right)\right]$$

È ammesso l'uso fino a $L/D = 8$ a patto che l'area calcolata non superi la sezione trasversale del volume da proteggere.

Se invece le componenti di velocità dell'aria tangenziale e assiale sono superiori a 20 m/s:

$$A_{v2} = \left[1 + \frac{\max(v_{axial}, v_{\tan}) - 20}{36} \cdot 0,7\right] \cdot A_{v1}$$

Le superfici di sfogo delle costruzioni all'interno delle quali c'è il pericolo di esplosione delle polveri, si devono prevedere delle superfici di sfogo:

$$A_{vBUILDING} = 1,7 \cdot A_{v1}$$

Questo fattore nasce dalla constatazione che le formule per il dimensionamento forniscono valori che stimano in difetto le superfici di sfogo quando ci troviamo in presenza di valori di $p_{red} \leq$ 50 bar g (fonte: [6]). Per questo la norma prevede un incremento del 70% dell'area di sfogo.

La superficie A_{v1} ottenuta va poi corretta tenendo conto di: inerzia dei sistemi di chiusura, caso in cui il volume occupato dalla polvere è una frazione del volume totale del contenitore, caso in cui la pressione iniziale > 1,2 bar e infine se vi sia la presenza di condotti di sfogo.

Interessa sottolineare l'importanza della correzione per condizioni di alta turbolenza.

La formula fondamentale il dimensionamento delle superfici di sfogo è stata sviluppata da sulla base dello studio di Ural, 2005 partendo da dati di prove sperimentali. Il valore di riferimento per l'intensità di turbolenza quando utilizziamo questa formula fondamentale è nell'intervallo di 2-6 m/s (u'_{RMS} nominale per la NFPA 68 - 2007).

Il 90% dei dati sperimentali è inviluppato nella formula che fornisce A_{v0} moltiplicando per un fattore di 1,7. Questo valore è stato ottenuto considerando che k_{st} e quindi la velocità di combustione variano linearmente con la intensità di turbolenza (vedi figura sotto), anche la superficie di sfogo dovrà variare linearmente con l'intensità di turbolenza. Inoltre per poter comprendere il 90% dei dati sperimentali dobbiamo utilizzare un valore di intensità di turbolenza vicino al limite superiore delle prove condotte nel reattore sferico (2-6 ms^{-1}) . Quindi è stato scelto il valore 5,6 ms^{-1}:

$$A_v = \begin{cases} A_{v0} \rightarrow u'_{RMS} \leq 2 \, m/s \\ A_{v0} \cdot \left[1 + 0,7 \dfrac{u'_{RMS} - 2}{3,6} \right] \rightarrow u'_{RMS} > 2 \, m/s \\ 1,7 \cdot A_{v0} \rightarrow u'_{RMS} = 5,6 \, m/s \end{cases}$$

4.3.2 VDI 3673 – 2002

La norma tecnica VDI 3673 Part 1, edizione di novembre 2002, dal titolo "Pressure venting of dust explosions" (VDI Richtlinie 3673 "Druckentlastung von Staubexplosionen") è una nuova versione del novembre 1992, che ha sostituito l'edizione del giugno 1979. Mentre prima i nomogrammi erano lo strumento di base per il dimensionamento, ora lo sono diventate le equazioni.

In questa nuova versione sono stati ampliati alcuni intervalli di applicabilità della norma: il volume del contenitore: da 1 m^3 a 0,1 m^3 e da 1000 m^3 a 10000 m^3 , la pressione statica di attivazione precedentemente limitata a 0,5 bar, ora da 0,1 bar a 1 bar, le polveri con un indice di deflagrazione pari a 800 bar • m / s, possono essere trattate. In precedenza il limite era fissato a 600 bar • m / s.

La norma ha un approccio all'argomento differente dalla NFPA 68 perché: separa il calcolo di dimensionamento del venting se si tratti di un'attrezzatura da proteggere o di un compartimento ed inoltre distingue ogni caso in base alla distribuzione della polvere nel volume: omogenea, non omogenea; infine distingue tra contenitori cubici ($L/D_e < 2$) e contenitori allungati ($L/D_e > 2$).

Le ipotesi di validità del metodo per il dimensionamento gli sfoghi di attrezzature sono:

(1) 0,1 $m^3 \leq V \leq 10000\ m^3$
(2) 0,1 bar $\leq p_{stat} \leq$ 1 bar
(3) 0,1 bar $\leq p_{red,MAX} \leq$ 2 bar dove $p_{red,MAX}$ è il valore massimo della pressione ridotta rispetto al tempo, durante l'esplosione;
(4) $p_{red,MAX} > p_{stat}$
(5) $\begin{cases} 5\,bar \leq p_{MAX} \leq 10\,bar \mapsto 10\,bar\,m/s \leq k_{st} \leq 300\,bar\,m/s \\ 5\,bar \leq p_{MAX} \leq 12\,bar \mapsto 300\,bar\,m/s \leq k_{st} \leq 800\,bar\,m/s \end{cases}$
(6) $L/D_e \leq 20$ dove $D_e = 2 \cdot \sqrt{\frac{A^*}{\pi}}\ [m^2]$ è il diametro equivalente (A^* sezione trasversale del volume da proteggere);

(7) L'area massima degli sgoghi deve essere inferiore alla sezione trasversale dell'attrezzatura;
(8) Efficienza degli sfoghi unitaria[s];
(9) Concentrazione omogenea della polvere

Infine si suppone che il sistema di chiusura si comporti come se fosse un diaframma di massa infinitesima, quindi con inerzia nulla. Se si utilizzano sistemi di chiusura con efficienza inferiore all'unità, l'area di sfogo necessaria va maggiorata.

[s] Si suppone che il sistema di chiusura si comporti come se fosse un diaframma di massa infinitesima, quindi con inerzia nulla. Se si utilizzano sistemi di chiusura con efficienza inferiore all'unità, l'area di sfogo necessaria va maggiorata.

Si utilizzano le seguenti formule per il dimensionamento della superficie di sfogo richiesta:

$$A_v = A_{v0} \cdot \left[1 + C \log\left(L / D_e \right) \right]$$

Dove:

$$A_{v0} = \left[3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{MAX} \cdot k_{st} \cdot p_{red,MAX}{}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{stat} - 1) \cdot p_{red,MAX}{}^{-0,5} \right] \cdot V^{0,753}$$

$$C = -4,305 \cdot \log(p_{red,MAX}) + 0,758$$

I simboli vogliono dire:

A_v	Area totale degli sfoghi richiesta [m²]
A_{v0}	Area di sfogo di base [m²]
p_{MAX}	Pressione massima di esplosione della polvere [bar]
k_{st}	Indice di esplosività della polvere combustibile [bar m s^{-1}]
$p_{red,MAX}$	Pressione ridotta [bar]
p_{stat}	Pressione di attivazione del sistema di chiusura dello sfogo [bar]
V	Volume da proteggere [m³]

La norma fornisce anche la stima approssimativa della lunghezza della fiamma che fuoriesce dall'apertura del venting ed avente direzione prevalente in quella di scarico:

$$L_f = a \cdot V^{1/3} \; dove \; a = \begin{cases} 8 \; Fiamma \; propagante \; in \; direzione \; verticale \\ 10 \; Fiamma \; propagante \; in \; direzione \; orizzontale \end{cases}$$

Essa inoltre fornisce la pressione di esplosione indotta nell'ambiente esterno al volume protetto:

$$p_{MAX,a} = 0,2 \cdot p_{red,MAX} A_v^{0,1} \cdot V^{0,18} \text{ [bar]}$$

La reazione dinamica sul volume protetto è fornita da:

$$F_{R,MAX} = \alpha \cdot A_v \, p_{red,MAX} \text{ [kN]}$$

dove si per la maggior parte delle applicazioni pratiche è sufficiente porre $\alpha = 119$

Per ricavare la pressione residua massima di progetto si fa riferimento alle caratteristiche meccaniche del metallo utilizzato per costruire l'attrezzatura. Per esempio le tensioni per diverse pressioni statiche applicate ad un tipico silo da prodotti fitofarmaci con spessore della parete pari a 3 mm ([1]):

Pressione statica [bar g]	**σ_{MAX} [MPa]**
0,20	142
0,25	166
0,30	179

Il valore di σ_{MAX} viene confrontato con il valore di 250 MPa pari allo snervamento per un acciaio austenitico maggiorato del 10% (secondo la VDI 2263 Part 3).

Più basso èil valore di p_{red} e maggiore sarà la lunghezza della fiamma che fuoriesce dal venting in caso d'esplosione. Quest'ultima è valutabile come ordine di grandezza usando un'equazione empirica: $L_{F,H}= 8\ V^{1/3}$ valida per polveri di classe St2.

Le condotte di scarico per il convogliamento dei prodotti dell'esplosione in un'area sicura possono essere efficaci, tuttavia la loro presenza influisce sul dimensionamento delle superfici di sfogo (aree maggiori), in quanto la lunghezza del condotto di scarico innalza la pressione ridotta all'interno del recipiente.

Le ipotesi di validità del metodo per il dimensionamento gli sfoghi di compartimenti sono:

(1) $0,002\,bar \leq p_{red,MAX} \leq 0,1\,bar$ (costruzione a bassa resistenza)

(2) $p_{stat} \leq 0,5\, p_{red,MAX}$

(3) $0,1 \text{ bar} \leq p_{red} \leq 2 \text{ bar}$

(4) Densità superficiale dei sistemi di chiusura $\leq 0,5$ kg m^{-2}

(5) $5\,bar \leq p_{MAX} \leq 10\,bar \mapsto 10\, {bar\, m}/{s} \leq k_{st} \leq 300\, {bar\, m}/{s}$

(6) Efficienza degli sfoghi unitaria

Definiamo.

L_1, L_2, L_3 [m] le dimensioni caratteristiche del volume da proteggere, dove L_3 è la dimensione massima della costruzione da proteggere.

Quindi $V = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3$ [m^3] e $D_e = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_1 \cdot L_2}{\pi}}$ [m^2].

L'area di sfogo del volume V sarà:

$$A_v = A_{v0} \cdot \left[1 + C \log({L}/{D_e}) \right]$$

$$A_{v0} = \left[3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{MAX} \cdot k_{st} \cdot p_{red,MAX}{}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{stat} - 1) \cdot p_{red,MAX}{}^{-0,5} \right] \cdot V^{0,753}$$

$$C = -4,305 \cdot \log(p_{red,MAX}) + 0,758$$

Dove:

A_v	Area totale degli sfoghi richiesta [m^2]
A_{v0}	Area di sfogo di base [m^2]
p_{MAX}	Pressione massima di esplosione della polvere [bar]
k_{st}	Indice di esplosività della polvere combustibile [bar m s^{-1}]
$p_{red,MAX}$	Pressione ridotta [bar]
p_{stat}	Pressione di attivazione del sistema di chiusura dello sfogo [bar]
V	Volume da proteggere [m^3]

4.3.3 UNI EN 14491:2006

La norma tecnica EN 14491:2006 "Sistemi di protezione mediante sfogo dell'esplosione di polveri" è una norma armonizzata ispirata alla Direttiva Europea ATEX 94/9/CE. Essa è è stata recepita in Italia nell'ottobre 2006 e quindi ha status di norma italiana a tutti gli effetti e specifica i requisiti di base per la progettazione e la scelta di un sistema di protezione mediante sfogo dell'esplosione di polveri. La norma fa parte di una serie che comprende il prEN 14797 "Dispositivi di sfogo dell'esplosione" e il prEN 14460 " Apparecchi resistenti all'esplosione". Infine l'applicazione del prEN 15089 "Sistemi di isolamento dell'esplosione" serve ad evitare il trasferimento delle esplosioni ad altre attrezzature o contenitori collegati.

Questa norma contiene:

1. i criteri per il dimensionamento degli sforzi per proteggere un contenitore[t] dagli effetti della sovrapressione generata da un'esplosione di polvere;
2. Gli effetti della propagazione della fiamma e della sovrapressione[u] nell'ambiente circostante al volume protetto;
3. La stima delle reazioni dinamiche dovute all'esplosione;
4. L'influenza dei condotti di sfogo.

Riguardo il dimensionamento degli sfoghi, questa norma ricalca la norma tedesca VDI3673. Inoltre anche in questo caso la validità delle formule è limitata a contenitori aventi un rapporto di forma $L/D \leq 20$.

<u>Formula per il dimensionamento della superficie di sfogo richiesta per un contenitore isolato:</u>

Le ipotesi di validità sono:

(1) $0{,}1\ m^3 \leq V \leq 10000\ m^3$
(2) $0{,}1$ bar $\leq p_{stat} \leq 1$ bar
(3) $0{,}1$ bar $\leq p_{red,MAX} \leq 2$ bar dove $p_{red,MAX}$ è il valore massimo della pressione ridotta rispetto al tempo, durante l'esplosione;
(4) $p_{red,MAX} > p_{stat}$
(5) $$\begin{cases} 5\,bar \leq p_{MAX} \leq 10\,bar \mapsto 10\ {bar\,m}/{s} \leq k_{st} \leq 300\ {bar\,m}/{s} \\ 5\,bar \leq p_{MAX} \leq 12\,bar \mapsto 300\ {bar\,m}/{s} \leq k_{st} \leq 800\ {bar\,m}/{s} \end{cases}$$

---

[t] Per contenitore si intende un volume che costituisce una parte ben identificabile distinta dell'impianto di processo.

[u] Il valore di picco della sovrapressione d'esplosione generata all'esterno è indicato con p_{ext}

(6) $L/D \leq 20$;
(7) L'area massima degli sgoghi deve essere inferiore alla sezione trasversale dell'attrezzatura;
(8) Efficienza degli sfoghi unitaria[v];
(9) Concentrazione omogenea della polvere

Le formule per il dimensionamento sono:

	0,1 bar ≤ $p_{red,MAX}$ ≤ 1,5 bar
CASO 1	$A = B \cdot \left[1 + C \log(L/D)\right] [m^2]$ $B = \left[3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{MAX} \cdot k_{st} \cdot p_{red,MAX}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{stat} - 1) \cdot p_{red,MAX}^{-0,5}\right] \cdot V^{0,753} \left[m^2\right]$ $C = -4,305 \cdot \log(p_{red,MAX}) + 0,758$ $A_v = A/E_f$ [m²] Area di sfogo richiesta

	1,5 bar ≤ $p_{red,MAX}$ ≤ 2 bar
CASO 2	$A = B\ [m^2]$ $B = \left[3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{MAX} \cdot k_{st} \cdot p_{red,MAX}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{stat} - 1) \cdot p_{red,MAX}^{-0,5}\right] \cdot V^{0,753} \left[m^2\right]$ $A_v = A/E_f$ [m²] Area di sfogo richiesta

[v] Si suppone che il sistema di chiusura si comporti come se fosse un diaframma di massa infinitesima, quindi con inerzia nulla. Se si utilizzano sistemi di chiusura con efficienza inferiore all'unità, l'area di sfogo necessaria va maggiorata del fattore di efficienza.

Dove:

A	Area geometrica degli sfoghi [m²]
B	Area di sfogo di base [m²]
p_{MAX}	Pressione massima di esplosione della polvere [bar]
k_{st}	Indice di esplosività della polvere combustibile [bar m s^{-1}]
$p_{red,MAX}$	Pressione ridotta [bar]
p_{stat}	Pressione di attivazione del sistemi di chiusurao dello sfogo [bar]
V	Volume da proteggere [m³]

Occorre sottolineare che queste formule devono essere affiancate da altri valori numerici reperiti dalla bibliografia tecnica o ottenuti da prove sperimentali quando:

(1) In condizioni di livelli di turbolenza modesti e quando la concentrazione della nube di polvere combustibile e aria non è omogenea o quando la concentrazione di polvere combustibile all'interno del contenitore non supera mai dei limiti molto bassi, l'applicazione delle formule produce dei valori approssimati per eccesso. Quindi l'area di sfogo può essere ridotta.

(2) In condizioni di livelli di turbolenza molto elevati oppure quando c'è il pericolo che la turbolenza possa essere indotta dagli ostacoli presenti, le formule forniscono un valore approssimato per difetto. In questo caso occorre aumentare l'area di sfogo.

Protezione di compartimenti mediante superfici di sfogo:

L'evoluzione dell'esplosione all'interno di un compartimento è influenza da dare diversi parametri come per esempio la forma geometrica del compartimento, la presenza di impianti di processo, la possibilità della propagazione da un compartimento all'altro e soprattutto la possibile presenza di polvere combustibile depositata su superfici piane, travi o tubature presenti all'interno del compartimento stesso. Le aperture di sfogo devono essere distribuite uniformemente sulle pareti che delimitano il contenitore e anche sul tetto, se presente.

Occorre attenzione a fissare la pressione ridotta $p_{red,MAX}$ sopportabile dalle strutture portanti della costruzione e tenere presenti le guenti considerazioni: il valore di $p_{red,MAX}$ è limitato inferiormente dal più debole elemento strutturale, i solai ed i tetti non sono concepiti per resistere ad alte pressioni con direzione dal basso verso l'alto, ma solo per pressioni in verso opposto. Il tetto può essere sfruttato come superficie di sfogo a patto che sia previsto per questo scopo e che la neve o il ghiaccio ne impediscano il corretto funzionamento.

Le ipotesi di validità della formula per il dimensionamento sono:

(1) $p_{red,MAX} \leq 0,1$ [bar]

(2) $p_{red,MAX} \geq p_{stat} + 0,02$ [bar]

La formula per il dimensionamento è:

$$A = C \cdot A_S \cdot p_{red,MAX}^{\ -0,5} \ [m^2]$$

Dove:

<table>
<tr><td>A</td><td>Area geometrica degli sfoghi [m²]</td></tr>
<tr><td>A_v</td><td>Area di sfogo richiesta $A_v = A/E_f$</td></tr>
<tr><td>C</td><td>Costante:
<table>
<tr><td>$0 < k_{st} \leq 100$</td><td>$C = 0,018^{0,5}\ bar$</td></tr>
<tr><td>$100 < k_{st} \leq 200$</td><td>$C = 0,026^{0,5}\ bar$</td></tr>
<tr><td>$200 < k_{st} \leq 300$</td><td>$C = 0,030^{0,5}\ bar$</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>A_s</td><td>Superficie interna del compartimento</td></tr>
<tr><td>$p_{red,MAX}$</td><td>Sovrapressione di esplosione massima sviluppata all'interno del compartimento durante un'esplosione</td></tr>
</table>

Come si può vedere la formula non contiene dei parametri che si riferiscono alla forma geometrica del volume da proteggere. Tuttavia se per esigenze particolari la superficie di sfogo deve essere posizionata soltanto su una parete e il volume ha una forma allungata, il fattore di forma L/D non può essere maggiore di tre.

Se per le strutture allungate consideriamo A_c [m²] l'area trasversale in direzione perpendicolare alla lunghezza massima del volume L [m], ed avente perimetro L_p [m] possiamo definire un dimetro equivalente pari a: $D = 4\,A_c/L_p$ [m]. Allora la restrizione per le strutture allungate è espressa da: $L < 12 \cdot \frac{A_c}{L_p} [m]$.

La norma si conclude con l'importante Appendice ZA, contenuto in ogni norma armonizzata, che chiarisce come sono stati realizzati i requisiti essenziali di sicurezza (RES) stabiliti nella direttiva europea 94/9/CE del tipo "nuovo approccio" secondo la direttiva europea prodotti da costruzione 89/196/CEE , recepita in Italia con il DPR 246/93. Questa appendice è importante perché la rispondenza ai RES elencati nella tavola ZA1 delle installazioni delle superfici di sfogo è una presunzione di conformità ai corrispondenti RES elencati nella Direttiva ATEX 94/9/CE. Questi parametri elencati entreranno nella futura marcatura CE del sistema di sfogo e quindi esso può liberamente circolare all'interno del mercato EEA (European Economic Area), costituito dagli stati aderenti alla Comunità Europea, dalla Norvagia, lo stato del Liechtenstein e l'Islanda.

4.4 CONFRONTI E LIMITI DELLE NORME PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE SUPERFICI DI SFOGO

Si confrontano le norme tecniche sulla tipologia di contenitori silos tozzi con fattore di forma geometrico $L/D \leq 3$ .. Poi saranno illustrate le limitaizoni nel caso di silos snelli $L/D \geq 3$. In fine saranno confrontati i risultati di esperimenti sulle esplosioni di polveri con superfici di sfogo con quelli della norma NFPA 68-2007.

SILOS TOZZI

Le norme tecniche utilizzate per il dimensionamento delle superfici di sfogo sono state messe a confronto in un apparato sperimentale di V = 500 m^3 con rapporto $L/D = 3$ ed utilizzando 200 kg di polvere combustibile immessa dall'alto ed innesco dal basso del silos. È interessante osservare come le norme tecniche VDI e NFPA sono rappresentate da curve che sovrastano tutte le altre. Questo vuol dire che le norme in questione sono le più conservative, quelle che hanno dei fattori di sicurezza molto elevati e per questo le aree calcolate con questi metodi sovrastimano l'area realmente necessaria (almeno 2-3 volte per k_{st}=115 bar m s^{-1} - polvere di classe St=1).

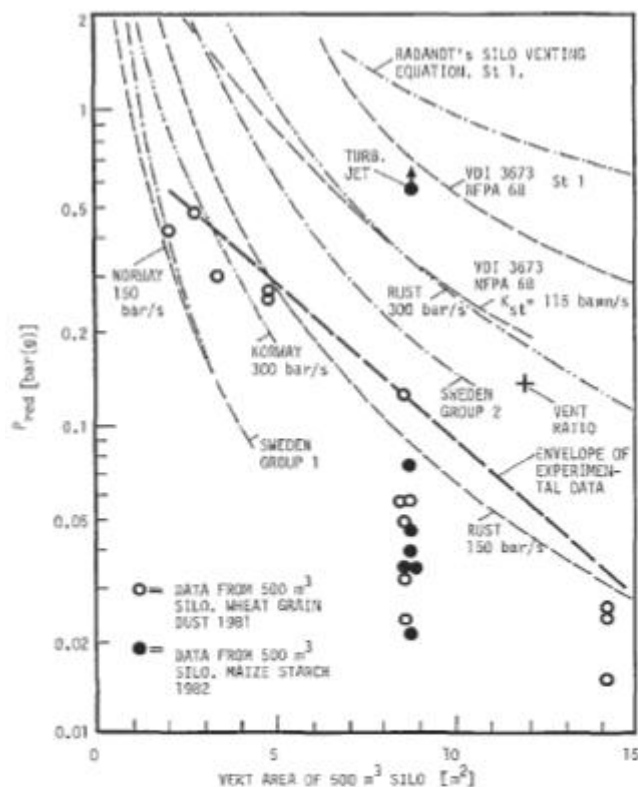



Figura 4.6 – Risultati degli esperimenti condotti in un silos di 500 m³ con polvere di amido di mais e polvere di grano. Confronto con i risultati previsti dalle norme tecniche utilizzate per il dimensionamento delle superfici di sfogo Infattio sono graficate le curve $p_{RED}/A_{venting}$. Il pallino nero indicato con una freccia verso l'alto turbulent jet), si riferisce ad una prova che ha causato la rottura delle pareti del silos (0,6 bar g), nonostante la superficie di sfogo.

SILOS SNELLI

Nel caso di silos con un rapporto di forma $L/D > 4$ sono stati condotti esperimenti e si è visto che un fattore importante ai fini della gravità dell'esplosione (p_{MAX}) è il punto in cui avviene l'accensione della nube di polvere combustibile ed aria (Figura 4.7). Nei casi reali si conosce il punto di innesco che può originare l'esplosione soltanto con un grado di incertezza, quindi questa variabilità è un problema nel dimensionamento delle superfici di sfogo a meno che non ci si pone nelle condizioni più sfavorevoli.

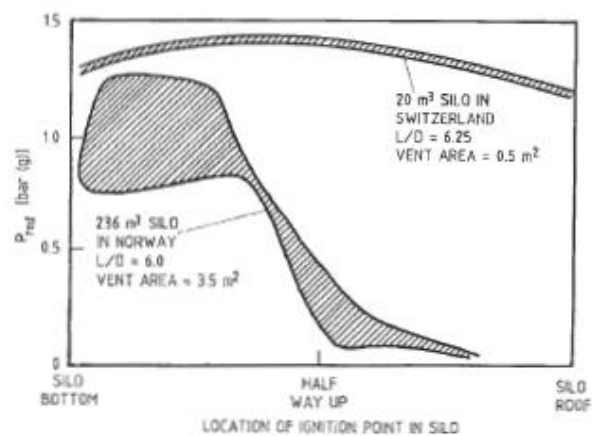



Figura 4.7 – Le due zone tratteggiate indicano l'inviluppo dei risultati ottenuti negli esperimenti condotti in due silos snelli variando il punto di innesco (innesco in basso→ valori di p_{RED} alti, innesco sul cielo del silos→ valori bassi di p_{RED}).

Se confrontiamo i risultati di prove sperimentali con corrispondenti dati calcolati utilizzando la norma NFPA68-2007 possiamo mettere risalto i punti di forza, cioè i casi in cui la norma rispecchia i dati misurati, e i limiti. A questo scopo sono stati raccolti sei gruppi di dati sperimentali riportati nella tabella sottostante:

Dati sper. #	Volumi (m^3)	L/D	K_{st} (bar-m/s)	Fonte:
1	18.5	1.6	144 - 630	Lunn et al (1988a) Vent Duct data not included in Set 1
2	18.5	1.6	20, 40	Lunn et al (1988b)
3	2.4 - 250	1 – 6.25	206 – 322	Formule per le correlazioni della NFPA68-2002
4	10 – 500	1 – 6.25	115 - 235	Zalosh 2008
5	20, 236	6, 6.25	100 - 240	Zalosh 2008
6	2.4 - 60	1 – 1.55	100 - 412	Lunn (1999a) Tamanini (1996)
7	18.5, 20	1.2, 2.4	71 - 528	Holbrow et al (2000)

Tabella 4-4 Dati sperimentali su esplosioni con superfici di sfogo per il confronto con i dati forniti dalla norma NFPA 68

Il grafico della Figura 4.8 ci mostra il confronto tra i valori delle superfici di sfogo calcolati (A_{v68}) con le formule della NFPA68-2007 e i valori delle superfici di sfogo usate nelle prove sperimentali ($A_{v\ exp}$) in funzione della pressione di resistenza del contenitore (p_{red}). Esso riporta i dati ottenuti dai sei insiemi. La retta $A_{v68}/A_{v\exp} = 1$ separa due zone:

$A_{v68}/A_{v\exp} < 1$ → sono i casi in cui le superfici di sfogo calcolate per ottenere il valore di p_red misurato nella prova, sono minori di quelle che invece sono necessarie in pratica per quel valore di p_{red};

$A_{v68}/A_{v\exp} > 1$ → sono i casi in cui le superfici di sfogo calcolate per ottenere il valore di p_red misurato nella prova, sono maggiori di quelle che invece sono necessarie in pratica per quel valore di p_{red};

Perciò concludiamo che i casi che necessitano maggiore cautela nell'applicazione della formula sono quelli con bassi velori di p_red. Questo è il motivo principale per cui la NFPA 68-2007 revede unba maggiorazione con un fattore 1,7 dell'area di sfogo nel caso dei compartimenti delle costrizioni in muratura o in cemento armato.

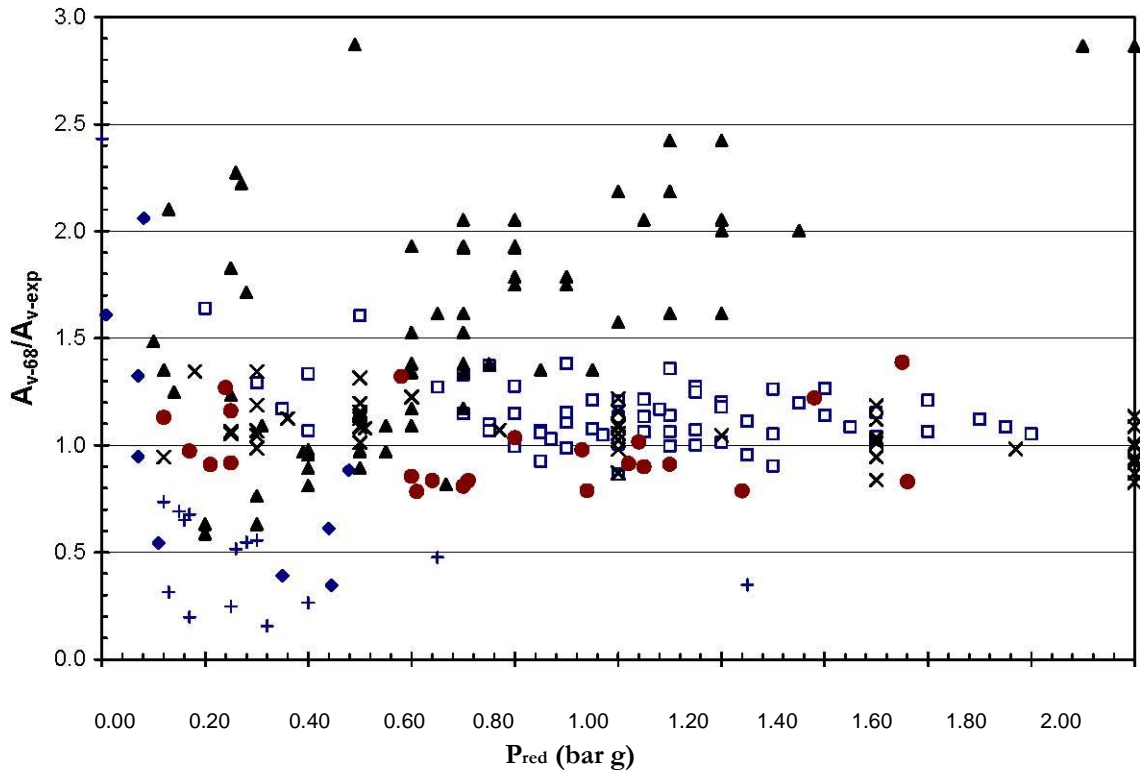



Figura 4.8 – Grafico del rapporto A_{v68}/A_{vexp} in funzione di p_{red}

Nel grafico di Figura 4.9, in modo analogo al grafico precedente, sono stati confrontati i valori delle superfici di sfogo calcolati (A_{v68}) con le formule della NFPA68-2007 e i valori delle superfici di sfogo usate nelle prove sperimentali ($A_{v\ exp}$) in funzione dell'indice di esplosività k_{st}. In questo caso la retta $A_{v68}/A_{v\exp} = 1$ distingue tra due zone del grafico:

- $A_{v68}/A_{v\exp} < 1$ → casi in cui le superfici di sfogo calcolate per il tipo di polvere con indice k_{st} , sono minori di quelle che invece sono necessarie in pratica per quel tipo di polvere;
- $A_{v68}/A_{v\exp} > 1$ → sono i casi in cui le superfici di sfogo calcolate per ottenere il valore di p_red misurato nella prova, sono maggiori di quelle che invece sono necessarie in pratica per quel valore di p_red.

Perciò dal grafico concludiamo che i casi che necessitano maggiore cautela nell'applicazione della formula sono quelli con valori di $k_{st} < 50$ bar m s^{-1} .

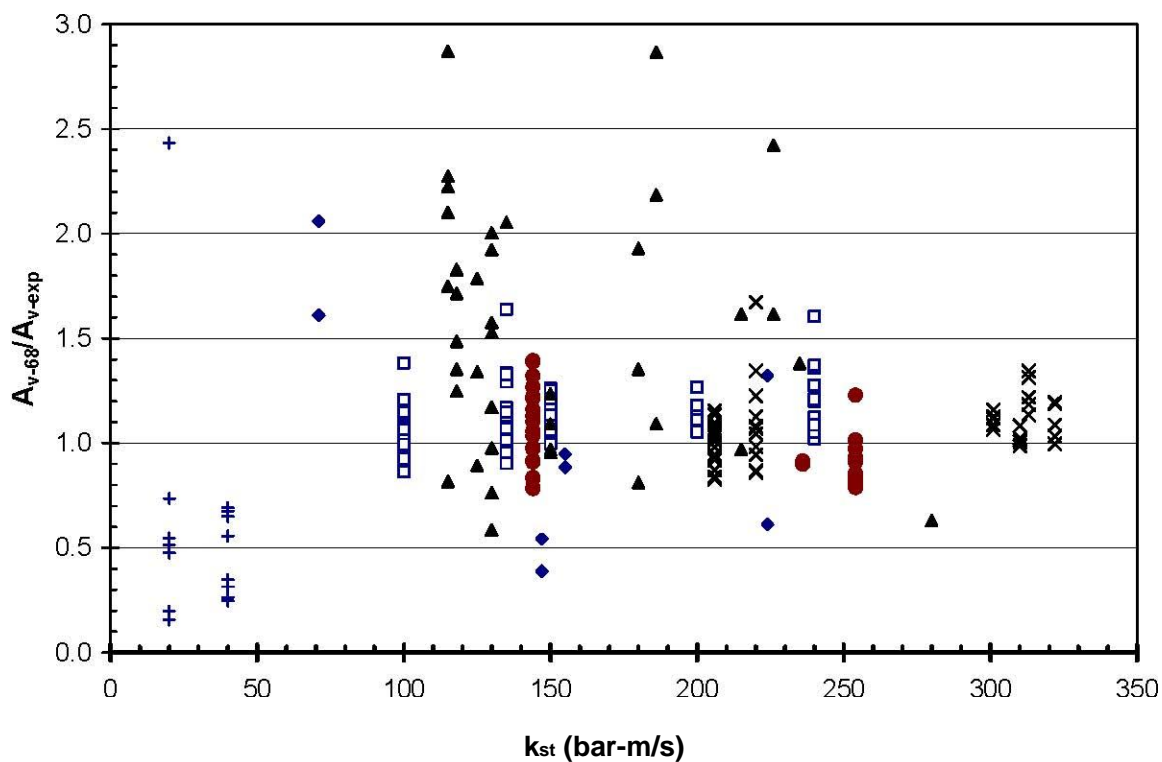



Figura 4.9 Grafico a punti del rapporto A_{v68}/A_{vexp} in funzione dell'indice di esplosività per i dati sperimentali riportati in Tabella 4-4.

4.5 EFFETTO DEL’INTENSITÀ DI TURBOLENZA SULLA PRESSIONE MASSIMA RAGGIUNTA IN UN’ESPLOSIONE CON SUPERFICI DI SFOGO

La conoscenza dell’andamento della turbolenza nelle prove di laboratorio sulle esplosività della polvere combustibile ha permesso di studiare l’effetto della turbolenza su volumi in scala reale. Infatti in questi esperimenti si suppone di conoscere la velocità quadratica media della velocità turbolenta, dal valore del tempo di ritardo tra il momento della disperazione della polvere e l’istante dell’accensione. Questa considerazione è stata utilizzata per studiare influenza dell’intensità della turbolenza sulla pressione massima generata durante l’esplosione.

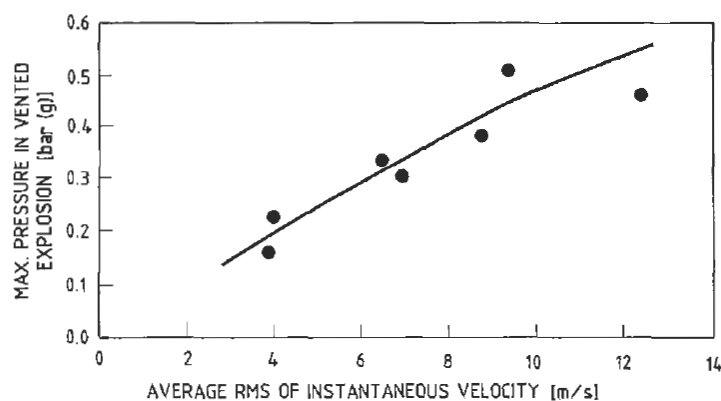



Figura 4.10 – Correlazione sperimentale tra p_{RED} e u'_{RMS} di prove di esplosioni di amido di mais in un volume di 64 m^3 a pianta rettangolare protetto con superfici di sfogo (area=5,6 m^2). La concentrazione della polvere è di 250 gm^{-3}. La sorgente d’accensione di tipo chimico ha energia di 5 J ed è posto al centro del volume. È importante osservare l’influenza dell’intensità della turbolenza sulla pressione massima raggiunta nel contenitore.

L’importanza di questi esperimenti risiede nella possibilità di collegare gli esperimenti sul venting, in cui la turbolenza è nota, al rischio di esplosione della polvere contenuta nelle attrezzature industriali, attraverso il livello di turbolenza misurato all’interno di esse. (fonte: Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries, 3 ed. Gulf Professional Publishing, New York, 2003).

4.6 ESTENSIONE DEI RISULTATI DEGLI ESPERIMENTI

I risultati degli esperimenti sull'esplosività e sul venting forniscono una quantità che è relativa al problema sperimentato. Prima di estendere questi risultati occorre una teoria per capire il comportamento del sistema reale:

Figura 4.11 - Occorre un collegamento, rappresentato da una teoria fisica, tra i risultati degli esperimenti e il loro utilizzo nei sistemi industriali.

Per esempio se consideriamo l'accensione della nube di polvere combustibile per mezzo di una scintilla di origine elettrica. Siccome ci sono molti tipi di sorgenti di accensione di tipo elettrico (arco elettrico, cariche elettrostatiche), si potrebbe costruire un prototipo reale con le sorgenti di accensione specifiche. Ma un approccio scientifico, prevede che sia costruito un apparato sperimentale. A questo punto occorre una teoria che permetta di collegare le grandezze reali con quelle utilizzate negli esperimenti.

BIBLIOGRAFIA DI SEZIONE

[1] Marcolin, Esplosioni di polveri: simulazione di una deflagrazione in un silo per stoccaggio di fitofarmaci Università degli Studi di Padova – Facoltà di Ingegneria

[2] Tamanini, F. (2001). "Scaling parameters for vented gas and dust explosions " Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 14(6), 455-461.

[3] Tamanini, F. (2002). "Dust explosion vent sizing - Current methods and future developments." Journal de Physique, IV(12), 7-31.

[4] Ural, E. A. (2001). "A simplified development of a unified dust explosion vent sizing formula." Process Safety Progress, 20(2), 136-144.

[5] Ural, E. A. (2005). "Dust explosion venting through ducts." In: AIChE loss prevention symposium, AIChE, ed.

[6] Zalosh, Robert, Explosion Venting Data and Modeling Literature Review, Fire Protection Research Foundation Report, 2008

[7] N. F. P. A. (1999). "NFPA 61." In: Standard for the Prevention of Fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Products Facilities, National Fire Protection Association, Quincy, MA USA.

[8] N. F. P. A. (2002). "NFPA 69." In: Standard on Explosion Prevention Systems.

[9] N. F. P. A. (2006). "NFPA 654." In: Prevention of Fire and Dust explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids.

[10] N. F. P. A. (2007). "NFPA 68." In: Guide for Venting of Deflagration, Quincy, MA USA.

[11] VDI Richtlinie 3673 "Druckentlastung von Staubexplosionen" -2002

[12] UNI EN 14491: 2006 "Sistemi di protezione mediante sfogo dell'esplosione di polveri"

[13] Van Wingerden, K. C. M. (2001). "Explosion Venting Techniques and Devices: current State of the European Draft Standards ", Research Bergen, Norway

[14] Zalosh, R. (2007). "New dust explosion venting design requirements for turbulent operating conditions." Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 20(Issues 4-6), 530-535.

CAPITOLO 5

CORRELAZIONE PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE SUPERFICI DI SFOGO

5.1 GENERALITÀ

I codici di calcolo che descrivono il fenomeno dell'esplosione con superficie di sfogo si possono classificare:

1. Modelli che risolvono il sistema di equazioni diferenziali e forniscono la pressione ridotta come funzione del tempo:
   - EFFEX sviluppato da Proust et al. Presso l'organizzazione INERIS;
   - ISOVEX sviluppato da Tamanini, presso la Factory Mutual Research Corporation;
2. Modelli fluidodinamici risolti con il metodo agli elementi finiti (Computational fluid dynamics = CFD):
   - Dust Explosion Simulation Code=DESC sviluppato da Skjold , British Health and Safety Laboratory, TNO danese e società tedesca INBUREX;
   - FLAX sviluppato dalla società GEXCON.

In questa ricerca invece saranno ricavate delle formule basate su dati sperimentali[w], che vogliono essere una vantaggiosa, ed altrettanto valida alternativa ai codici di calcolo che si stanno affermando per lo studio del pericolo delle esplosioni di polveri e, in particolare, per la protezione di attrezzature e costruzioni con superfici di sfogo.

[w] Le relazioni matematiche basate su dati sperimentali sono definite **correlazioni**. Una correlazione descrive la tendenza della variazione di una variabile ad accompagnarsi con la variazione lineare di un'altra variabile (fonte: Dizionario tecnico scientifico della lingua italiana, 2007, Ed. Hoepli, Milano).

Infatti può essere utile utilizzare i calcoli manuali, in quanto i codici di calcolo hanno questi limiti:

1. I codici di calcolo sono costosi;
2. È necessaria l'esperienza e la sensibilità di calcolo degli operatori che immettono i dati
3. Spesso è necessaria le conoscenza di linguaggi di programmazione (C++)

Al contrario i calcoli eseguiti "a mano" presentano i seguenti vantaggi:

1. Rapidità per risolvere problemi, anche se poi il risultato è approssimato;
2. Sono accessibili a tutti gli scienziati e quindi non bisogna affrontare un costo per usufruirne;
3. Verifiche dell'esattezza dei risultati e della mancanza di errori più rapide.

5.2 LIMITI DEI METODI DI MISURA DELLE VELOCITÀ DI COMBUSTIONE

Come abbiamo visto nel CAPITOLO 3, le velocità di combustione laminare e turbolenta di una nuvola di polvere combustibile ed aria sono determinate con prove di laboratorio.

I metodi per determinare la velocità di combustione si fondano sull'utilizzo di due tipi di fiamme:

(1) **Fiamme in propagazione**: il metodo di misurazione in un reattore sferico chiuso permette la misurazione della velocità di combustione laminare attraverso l'andamento della sovrapressione nel tempo e la variazione della velocità di fiamma durante la combustione effettuata a volume costante; invece quando ci sono le fiamme che si propagano all'interno di tubi cilindrici aperti, come per esempio il tubo di Hartmann, la misurazione della velocità di combustione è condotta usando le riprese video dell'esperimento e applicando la legge di conservazione della massa;

(2) **Fiamme in condizioni stazionarie**: la misura effettuata utilizzando il bruciatore Bunsen si ottiene dall'angolo del cono che forma la fiamma e dal flusso i prodotti della combustione.

Per le nubi di polvere organica naturale combustibile ed aria la velocità di combustione laminare e lo spessore della fiamma sono proprietà intrinseche della nube perché la fase di combustione, svolgendosi in modo omogeneo (vedi Paragrafo 3.3), avvicina il fenomeno a quello della combustione dei gas. Invece in altri casi di combustione di polveri, la reazione, svolgendosi in maniera eterogenea, dipende dal tipo di attrezzatura utilizzata per la prova e anche dal tipo di campione di polvere combustibile.

Quando si utilizza un reattore sferico chiuso, le polveri combustibili, a differenza dei gas, presentano delle velocità di sedimentazione e quindi tutti gli esperimenti sulla velocità di combustione devono essere eseguiti necessariamente con un certo grado di turbolenza. Il valore di velocità di combustione laminare è ottenuto estrapolando il valore a zero turbolenza dalle altre misure effettuate variando il tempo di ritardo tra la fine della dispersione e l'innesco della scarica.

In definitiva i metodi di prova sono influenzati dai seguenti fenomeni: anzitutto la turbolenza residua a valle della dispersione della polvere combustibile e quindi la concentrazione non omogenea all'interno del reattore di prova, la turbolenza generata durante la sedimentazione della

polvere, la sensibilità del fronte di fiamma alla curvatura e il disturbo prodotto dai gas caldi della combustione.

Spore di licopodio	**Metodo sperimentale**	**Conc. [g m-3]**	S_{uL} **[m s-1]**
	Sfera 20 l	1000	0,17
	Condotto 200 x 200 mm²	35-100	0,47
	Bruciatore	150-450	0,30

Come si può notare nei risultati della velocità di combustione laminare è presente uno scarto dal valore medio (0,30 ms^{-1}) del 43% e del 56,6%.

Amido di mais	**Metodo sperimentale**	**Conc. [g m-3]**	S_{uL} **[m s-1]**
	Sfera 20 l	400	0,13
	Condotto 200 x 200 mm²	235	0,27
	Bruciatore	400-800	0,20

In questo caso nei risultati della velocità di combustione laminare è presente uno scarto dal valore medio (0,20 ms^{-1}) del 35%.

5.3 RELAZIONE FONDAMENTALE

In questo paragrafo sarà ricavata una relazione matematica che lega la velocità di combustione laminare con la velocità di combustione turbolenta di una nuvola di polvere combustibile ed aria, che sarà utilizzata per ricavare la correlazione empirica per il calcolo delle superfici di sfogo.

Durante l'esplosione di una nube di polvere combustibile organica naturale ed aria, il fronte di fiamma può considerarsi il regime laminare durante la stadio iniziale; dopo di che il flusso assume una connotazione turbolenta e il fronte di fiamma diventa aggrinzato e la velocità di combustione aumenta. La transizione tra i due regimi è causata da tre tipologie di fenomeni che differiscono per l'origine e che sono:

1. Instabilità della fiamma;
2. Turbolenza generata da ostacoli presenti
3. Turbolenza causata dalla rimozione dei sistemi di chiusura delle aperture degli sfoghi.

Per studiare la relazione tra la velocità di combustione laminare e turbolenta, osserviamo che le fiamma turbolenta ha un'area maggiore (A_I) rispetto all'area proiettata in direzione perpendicolare a quella di propagazione della fiamma (A_T) come si può vedere dalle formule seguenti (vedi Figura 5.1):

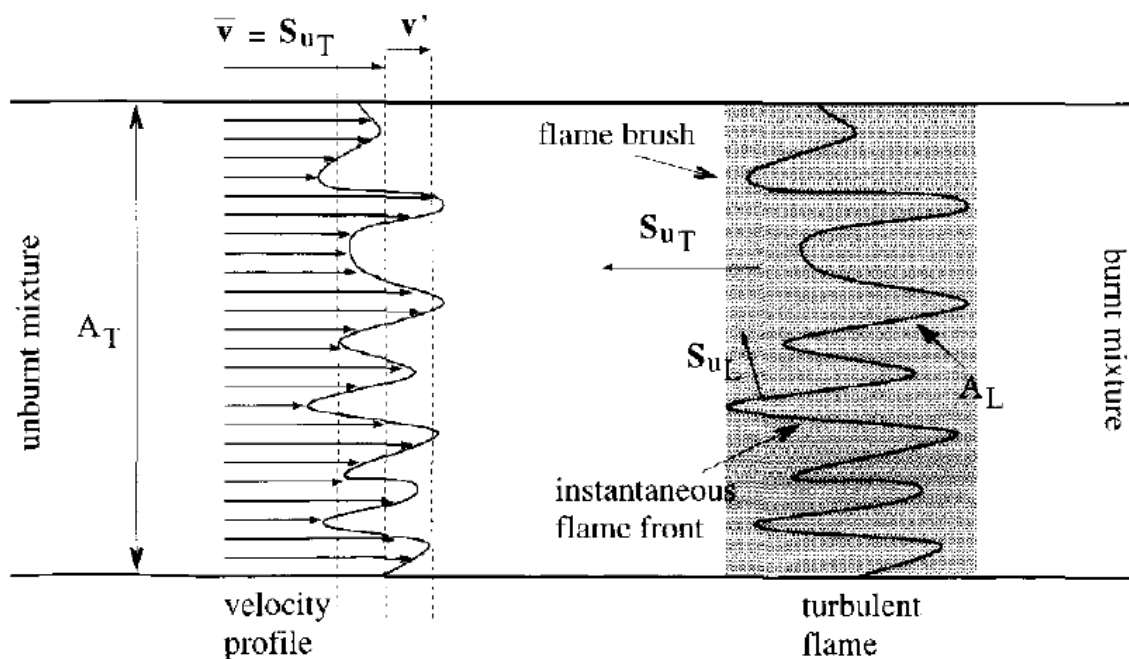



Figura 5.1 – Struttura semplificata di una fiamma premiscelata turbolenta piana. In questo caso si può parlare di un profilo medio della fiamma nel tempo (simile ai peli di un pennello che oscillano velocemente) e in questo modo possiamo parlare di una velocità turbolenta di combustione e uno spessore di fiamma turbolenta.

Applicando la legge di conservazione della massa, si trova il rapporto tra la velocità di combustione in regime turbolento e velocità di combustione in regime laminare:

$$\dot{m} = \rho_u A_T S_{uT} = \rho_u A_L S_{uL} \Rightarrow \frac{S_{uT}}{S_{uL}} = \frac{A_L}{A_T} \gg 1$$

Ipotizzando che: $S_{uT} \simeq S_{uL} + u'_{RMS}$, otteniamo:

$$\frac{A_L}{A_T} = \frac{S_{uL} + u'_{RMS}}{S_{uL}} = 1 + \frac{u'_{RMS}}{S_{uL}}$$

E quindi:

$$\frac{S_{u_T}}{S_{u_L}} = 1 + \frac{u'_{RMS}}{S_{u_L}}$$

Al limite, quando $u'_{RMS} \gg S_{uL}$, questa uguaglianza diventa:

$$S_{uT} \simeq u'_{RMS}$$

E vuol dire che la velocità di combustione si svincola dai fenomeni chimici, e dipende soltanto dal regime di moto del flusso (ipotesi di Damkohler).

Questo semplice modello è stato sostituito da una formula generalizzata:

$$\boxed{\frac{S_{uT}}{S_{uL}} = 1 + C\left(\frac{u'_{RMS}}{S_{uL}}\right)^n}$$

Dove:

C	Costante che misura la reattività alla turbolenza della velocità di combustione turbolenta all'intensità della turbolenza	Bassa turbolenza	$C = 1$	$n = 1$
		Media turbolenza	$C = \sqrt{5/12}$	$n = 1$
		Alta turbolenza	$C = \sqrt{2}$	$n = 1/2$
n	Esponente di curvatura della fiamma			

Per i gas i valori più utilizzati di quese due costanti sono: 1≤C≤4 0,5≤n≤1. Noi supporremo C=0,14.

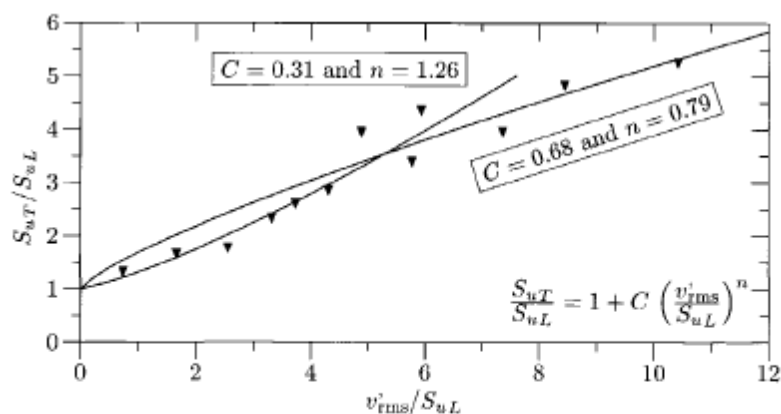



Figura 5.2 – Interpolazione e confronto tra i dati sperimentali della combustione di amido di mais disperso in aria con la formula generalizzata della combustione turbolenta. Sono necessarie due curve matematiche per seguire tutto l'insieme dei valori sperimentali.

Per la nostra applicazione, utilizzeremo una relazione di proporzionalità lineare della velocità di combustione turbolenta:

$$\boxed{S_{uT} = S_{uL} + Cu'_{RMS}} \qquad (5.1)$$

Nella tabella seguente, sono riportati gli studi dei ricercatori che hanno studiato i limiti di validità di questa relazione lineare:

Tipo di polvere	**Attrezzatura di prova**	**Ricercatori (anno)**	**Valore limite di proporzionalità di u'_{RMS}**
Amido di mais (300 e 700 g m^{-3})		Tezok et al (1986)	7 ms^{-1}
Amido di mais Alluminio	Contennitori di volume variabile da 9 a 950 l	Pu, Jarosinski 1989 Pu, Jarosinski 1990	3,3 ms^{-1}
Licopodio Amido di patate Carbne attivato	Sfera 20 l con anello perforato di dispersione	Van der Wel (1993)	3 ms^{-1}
Licopodio Polvere di grano Amido di mais	Contenitore sferico di 1,25 m^3	Gieras et al. (1996)	10 ms^{-1}
Amido di niacina Licopodio RDX Polvere di silicone	Contenitore 20 l cubico Contenitore 20 l USBM con ugello (rebound)	Skjold (2003)	Valore nel punto di flesso della curva pressione tempo dell'esplosione
Polvere-aria Gas-aria	Contenitori vari	Pu et al (2007)	3 ms^{-1}

Tabella 5-1 Relazioni di proporzionalità tra la velocità di combustione turbolenta e l'intensità di turbolenza valide fino al valore misurato

5.4 CORRELAZIONE PER LE VELOCITÀ DI COMBUSTIONE

L'effetto della temperatura e della pressione sulla velocità di combustione laminare può essere espresso in questa forma:

$$S_{uL} = S^0_{uL}\left(\frac{T_U}{T_0}\right)^{\alpha}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\beta} \quad (5.2)$$

Dove:

Simbolo	Descrizione	Valori
$S^0_{u_L}$	Velocità di comb. laminare a T_0 p_0	
T_U p	Temperatura e pressione della miscela incombusta	
α β	Esponenti trovati empiricamente (funzione del rapporto di equivalenza; fonte Dahoe 2002)	α= 2,0 ÷ 1,7 Eckhoff, 2003 van Wingerden 1996 β= -0,5 ÷ -0,36 Dahoe et al. 1996; Eckhoff 2003

Considerando che la combustione avvenga a volume costante ed in modo adiabatico, possiamo fare uso della legge della trasformazione adiabatica per i gas perfetti:

$$\left(\frac{T_U}{T_0}\right) = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (5.3)$$

Dove si può porre γ= 1,4 [x].

Quindi sostituendo (5.3) in (5.2), abbiamo:

$$S_{uL} = S^0_{uL}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{0,14} \quad (5.4)$$

E finalmente otteniamo, sostituendo la (5.4) nella(5.1):

$$\boxed{S_{uT} = S^0_{uL}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{0,14} + Cu'_{RMS}} \quad (5.5)$$

[x] γ è il rapporto tra i calori specifici dei gas che si liberano prima della combustione della nube di polvere ed aria rispettivamente a pressione e a volume costanti.

5.5 CORRELAZIONE PER LA VELOCITÀ DI FIAMMA

Supponendo che lo spessore del fronte di fiamma della nube di polvere durante la combustione sia molto minore dell'ordine del centimetro e trascurando il parametro turbolento della scala dei vortici perché ha importanza secondaria rispetto al parametro intensità di turbolenza u'_{rms} , quando la nube di polvere combustibile organica naturale ed aria brucia all'interno di un reattore sferico avente raggio r, abbiamo visto che la sovrapressione segue un andamento indicato in figura:

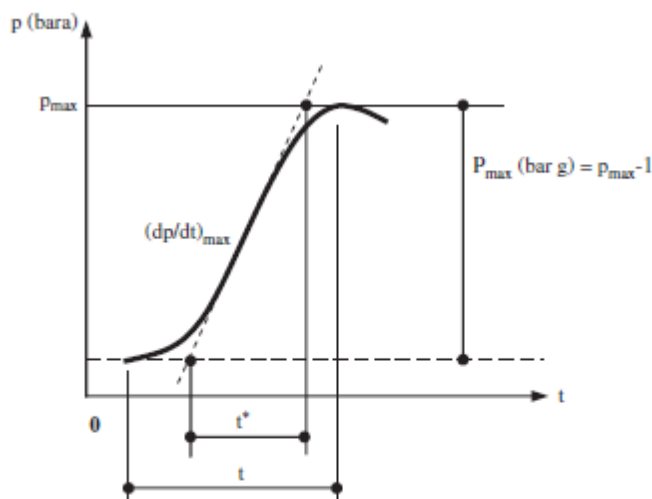



Figura 5.3 – Grafico dell'andamento della pressione in funzione del tempo all'interno del reattore sferico di 20l.

Dalla figura ricaviamo questa relazione trigonometrica:

$$p_{MAX} = t^* \cdot \tan(\alpha) = t^* \cdot \left. dp \middle/ dt \right._{MAX}$$

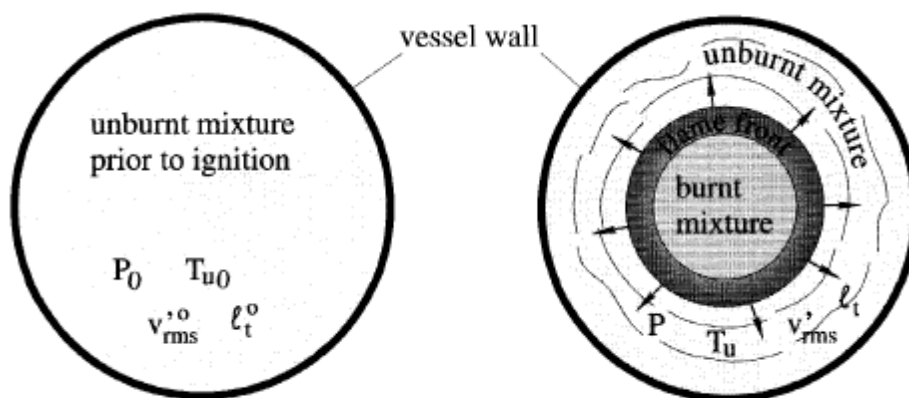



Figura 5.4 – Propagazione dell'esplosione nel reattore sferico. Si vede il fronte di fiamma e la zona di combustione.

Se la fiamma parte dal centro della sfera (Figura 5.4), essa raggiungerà il bordo della sfera nel tempo:

$$t^* = \frac{p_{MAX}}{\left. dp \middle/ dt \right._{MAX}} .$$

Quindi:

$$\left.\begin{array}{l} \overline{S_F} = \dfrac{r}{\Delta t} \\ r \propto V^{1/3} \\ t^* \propto \dfrac{p_{\max}}{\left(\dfrac{dp}{dt}\right)_{\max}} \end{array}\right\} \Rightarrow \qquad \overline{S_F} \propto V^{1/3} \frac{\left(\dfrac{dp}{dt}\right)_{\max}}{p_{\max}}$$

Che è una relazione di proporzionalità tra la velocità di fiamma e le caratteristiche geometriche del contenitore e le caratteristiche della polvere combustibile.

Poiché: $k_{st} \triangleq \left(\dfrac{dp}{dt}\right)_{\max} V^{1/3} \Rightarrow$ si ha:

$$\overline{S_F} \propto \frac{k_{st}}{p_{\max}} \qquad (5.6)$$

Poiché la relazione tra velocità di combustione e velocità di fiamma è:

$$\overline{S_F} = S_C \, E \qquad (5.7)$$

Dove E è il coefficiente di espansione dei prodotti della combustione[y].

Questa relazione si può ritenere valida in queste ipotesi:

- fronte di fiamma piano, sferico o emisferico;
- flusso laminare;
- gas di combustione si trovano sempre dietro rispetto alla direzione di propagazione del fronte di fiamma.

[y] Il coefficiente d'espansione esprime l'incremento di volume dovuto alla combustione ed è definito come il rapporto tra le densità dei prodotti gassosi della combustione e la densità dei prodotti gassosi prima della combustione.

Sostituendo la (5.5) dentro la (5.7), e tenendo conto della (5.6), otteniamo:

$$\overline{S_F} = \left[S^0_{u_L} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0,14} + Cu'_{RMS} \right] \cdot E \propto \frac{k_{st}}{p_{max}} \qquad (5.8)$$

Ponendo:

$$\begin{cases} S^0_{u_L} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0,14} \cdot E = C_{lam} \frac{k_{st}}{p_{max}} & (5.9) \\ Cu'_{RMS} \cdot E = \widetilde{C_{turb}} \frac{k_{st}}{p_{max}} = C_{turb} u'_{RMS} \frac{k_{st}}{p_{max}} & (5.10) \end{cases}$$

Possiamo riscrivere la (5.8) in questa forma più utile:

$$\boxed{\overline{S_F} = C_{lam} \frac{k_{st}}{p_{max}} + C_{turb} u'_{RMS} \frac{k_{st}}{p_{max}}} \qquad (5.11)$$

Per poter utilizzare questa formula per calcolare la velocità di fiamma (e poi per calcolare la pressione sviluppata durante l'esplosione in funzione della turbolenza) occorre conoscere i valori di C_{lam} e C_{turb}, che per comodità riscriviamo in questa forma:

$$\begin{cases} C_{lam} = \left(S_{uL}^{0} \cdot \left(\frac{p_{max}}{p_0} \right)^{0,14} \right) \cdot E_{min} \frac{P_{max}}{k_{st}} \\ C_{turb} = C \cdot E_{min} \cdot \frac{P_{max}}{k_{st}} \end{cases}$$

Per calcolare le costanti precedenti, abbiamo utilizzato le seguenti assunzioni:

- ✓ questi coefficienti sono stati valutati nell'istante in cui si raggiunge il massimo dell'esplosione, rappresentato dal punto di masimo della curva presione – tempo, cioè quando gli effetti dell'esplosione sono massimi;
- ✓ $p_{max} = P_{max} + 1\ [bar\ g]$ è la sovrapressione d'esplosione
- ✓ Al coefficinte di espansione E è stato dato il valore minimo che esso assume alla fine di un'espansione adiabatica→ E_{min}.

Durante la combustione, il coefficiente d'espansione volumetrica varia a causa di due fenomeni distinti:

- Aumento di temperatura dovuto alla combustione, che è una reazione esotermica;
- Variazione del numero di moli tra reagenti e prodotti della reazione. Infatti l'aria, partecipante alla combustione, è composta soprattutto da Azoto, elemento che non partecipa alla reazione. Quindi si può ritenere che la variazione di moli tra reagenti e prodotti sia trascurabile;

Durante una **reazione di combustione a volume costante**, come si può ritenere quella nel reattore sferico di prova di 20 l, il coefficiente d'espansione varia da un massimo, ad un minimo:

- Come è stato dimostrato da vari ricercatori (Bjerktvedt, Van Wingerden, 1997) il valore minimo del coefficiente di espansione è ottenuto all'inizio della reazione condotta a pressione costante atmosferica ed è approssimato da:

$$E^0 \cong \frac{p_{\max} - p_0}{p_0} = \frac{p_{\max}}{p_0}$$

- Invece alla fine della combustione isocora ed adiabatica, per la conservazione della massa, si può ritenere che la densità dei prodotti della combustione sia uguale a quella della miscela all'inizio della combustione, quindi:

$$\rho_{b,f} = \rho_0 \Rightarrow E_{\min} = \frac{\rho_{u,f}}{\rho_{b,f}} = \frac{\rho_{u,f}}{\rho_0} = \left(\frac{p_{\max}}{p_0} \right)^{1/\gamma}$$

Dove si è fatto uso dell'equazione della compressione adiabatica (a volume costante) per i gas perfetti:

$$\frac{T_u}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

Quindi adesso possiamo ricavare i valori di C_{lam} C_{turb} partendo dalle caratteristiche di esplosività delle polveri organiche naturali:

ID	Tipo polvere	Conc [g m-3]	S_{uL} [m s-1]	k_{st} [bar m s-1]	P_{max} [bar g]	Ricercatori
01	Licopodio	60-175	0,41	129	6,7	Pedersen, Van Wingerden (1995)
02	Amido di mais 15μm	800	0,18	158	9,7	Van der Wel (1995)
03	Amido di mais	75-275	0,30 max	202/215	10,3/9,4	Proust e Veyssiere (1998)
04	Amido di mais	330	0,29	202/215	10,3/9,4	Dahoe et al. (2002)
05	Amido di mais	370	0,38	202/215	10,3/9,4	Krause et al. (1996)
06	Amido di mais 14 μm	100-400	0,29	158	9,7	Wang et al. (2006)
07	Amido di patata 26 μm	1000	0,17	60	7	Van der Wel (1993)
08	Licopodio	200	0,42	515/475	11.2/12	Krause et al. (1996)
09	Licopodio 33 μm	450	0,30	165	7,3	Van der Wel (1993)

Tabella 5-2 Prove di laboratorio sull'esplosività eseguite su polveri organiche naturali reperite nella bibliografia

ID	Tipo polvere	Conc [g m-3]	C	Ricercatori
01	Amido di mais	300-700	0,44	Tezok et al. (1986)
02	Licopodio	70	0,37	Gieras et al. (1995)
03	Polvere di grano	200	0,16	Gieras et al. (1995)
04	Amido di mais	220	0,46	Gieras et al. (1995)
05	Amido di patata	500-625	0,26	Zevenbergen (2006)
06	Amido di patata	1000	0,32	Zevenbergen (2006)
07	Licopodio	500	0,72	Van der Wel (1993)
08	Amido di mais	400	0,55	Van der Wel (1993)

Tabella 5-3 Valori del coefficiente (= reattività alla turbolenza) che serve a legare la velocità di combustione turbolenta con il valore quadratico medio della componente turbolenta della velocità, reperiti nella bibliografia.

I valori medi che si ottengono utilizzando i valori delle Tabella 5-2 e Tabella 5-3, sono:

$$\overline{C_{lam}} = 0,11$$

$$\overline{C_{turb}} = \frac{\widetilde{C_{turb}}}{u'_{rms}} = 0,15$$

Quindi otteniamo:

$$\boxed{\overline{S_F} = 0,11 \cdot \frac{k_{st}}{p_{\max}} + 0,15 \cdot u'_{RMS} \cdot \frac{k_{st}}{p_{\max}}} \quad (5.12)$$

Ricordando le equazioni (5.9) e (5.10) alla luce delle considerazioni sul coefficiente d'espansione:

$$\begin{cases} S^0_{uL} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0,14} \cdot E = C_{lam} \frac{k_{st}}{p_{\max}} & (5.9) \\ C u'_{RMS} \cdot E = \widetilde{C_{turb}} \frac{k_{st}}{p_{\max}} = C_{turb} u'_{RMS} \frac{k_{st}}{p_{\max}} & (5.10) \end{cases}$$

Possiamo scrivere:

$$S^0_{uL} = 0,11 \frac{k_{st}}{p_{\max} \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0,14} \cdot E_{\min}} \quad (5.13)$$

$$C = 0,15 \cdot u'_{RMS} \frac{k_{st}}{p_{\max} \cdot u'_{RMS} \cdot E} \quad (5.14)$$

E quindi la (5.8) diventa:

$$\overline{S_F} = \frac{k_{st}}{P_{MAX} \left(\frac{p_{\max}}{p_0} \right)^{1/\gamma}} \left[0,11 \left(\frac{p_0}{p_{\max}} \right)^{0,14} + 0,15 u'_{RMS} \right] \cdot E \quad (5.15)$$

Da cui possiamo ricavare l'espressione della velocità di combustione turbolenta, per confronto con la (5.7):

$$S_{uT} = \frac{k_{st}}{P_{MAX}\left(\frac{p_{max}}{p_0}\right)^{1/\gamma}}\left[0,11\cdot\left(\frac{p_0}{p_{max}}\right)^{0,14} + 0,15\cdot u'_{RMS}\right] \quad (5.16)$$

Nei due grafici seguenti, si sono messi a confronto i valori ricavati facendo uso della formula (5.15) e (5.16) e quelli misurati in laboratorio, reperiti nella bibliografia:

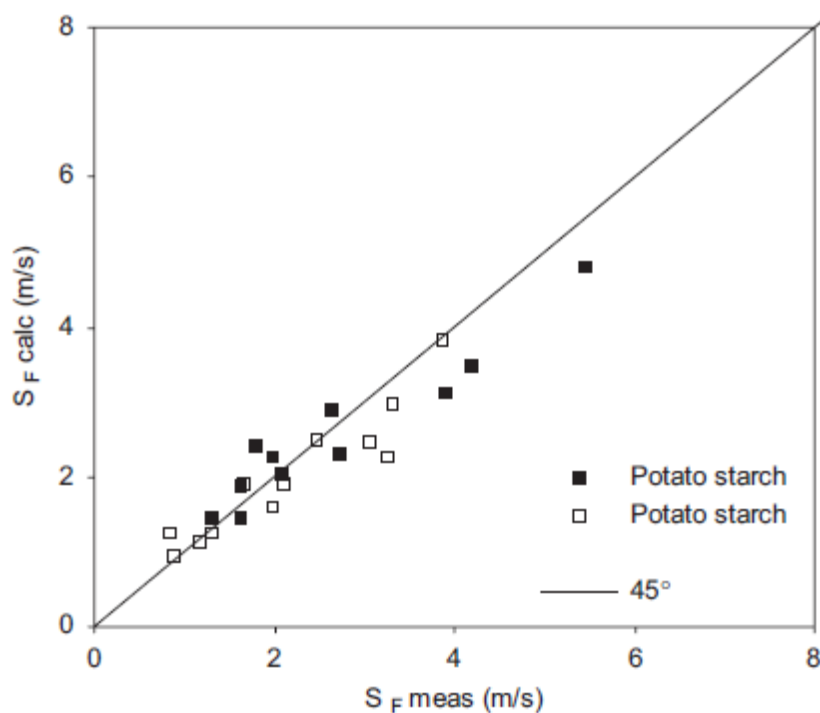



Figura 5.5 – Il grafico esprime il confronto tra la velocità di fiamma calcolata (asse ascisse) con la formula (5.15) e quella misurata in laboratorio (tabella 5.2). Come si può vedere i punti sono addensati intorno alla bisettrice, che è un marker dell'esattezza della formula ricavata.

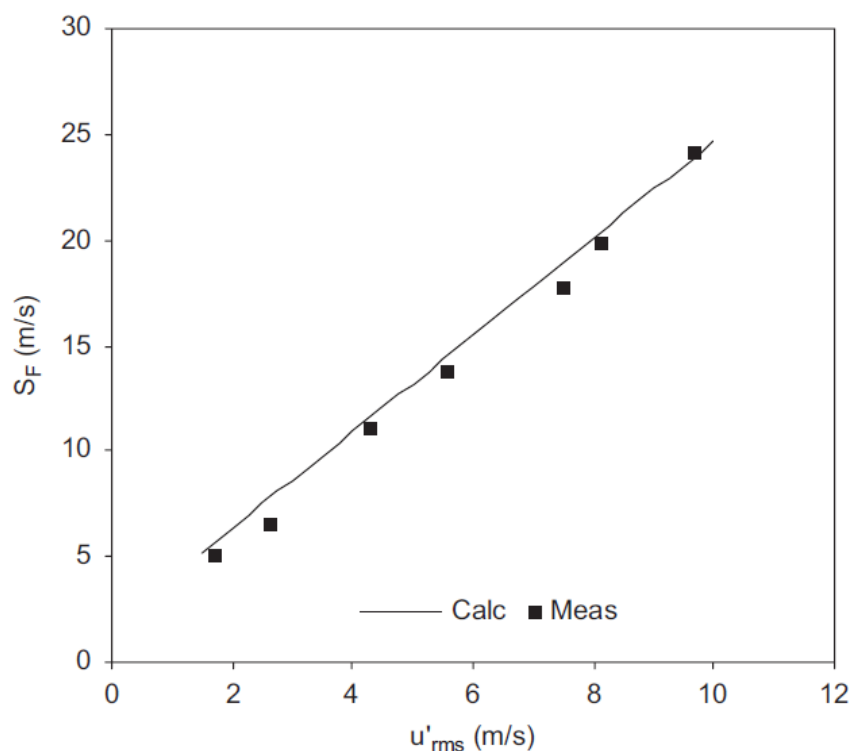



Figura 5.6 - Il grafico esprime il confronto tra il valore quadratico meio della componente di velocità turbolenta misurata in laboratorio dal ricercatore Gieras et al. 1996 e quella calcolata con la formula (5.15). Anche in questo caso i punti sono addensati intorno alla bisettrice, fatto che è un marker dell'esattezza della formula ricavata.

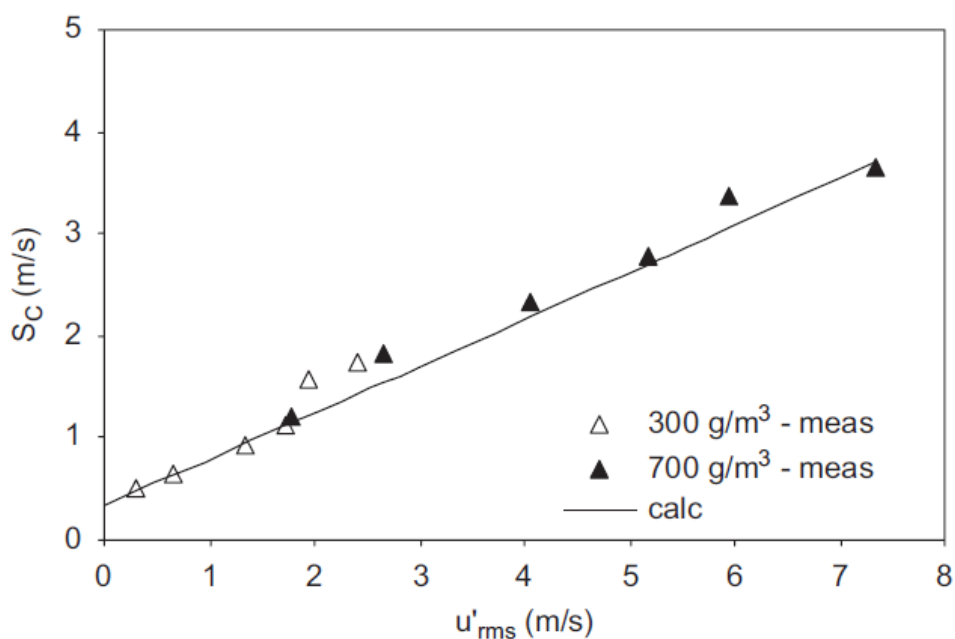



Figura 5.7 – Confronto tra i valori di velocità di combustione calcolati con la formula (5.16) e quelli della letteratura di Tezok et al., 1986 sull'amido di mais. Anche in questo caso i punti sono addensati intorno alla bisettrice, fatto che è un marker dell'esattezza della formula ricavata.

5.6 CORRELAZIONE PER LA SOVRAPRESSIONE DI ESPLOSIONE

Si tratterà una correlazione empirica che serve per valutare la sovrapressione di esplosione all'interno di silos e di contenitori quasi cubici, in base ai parametri più importanti caratteristici dell'esplosione:

(1) Tipo di polvere;

(2) Livello di turbolenza iniziale, prima dell'accensione (u'_{RMS});

(3) Velocità della fiamma;

(4) Coefficiente caratteristico dello sfogo $K_{vent} = \frac{A_{top}}{A_{vent}}$

(5) Pressione di attivazione del sistema di chiusura dello sfogo (p_{stat}).

Infatti tutti i risultati delle prove sperimentali sul venting di attrezzature allungate hanno dimostrato che la velocità del fronte di fiamma della nube di polvere e quindi la sovrapressione sviluppata dall'esplosione e il fattore di geometria L/D sono in reciproca dipendenza (Harris 1983).

I volumi da proteggere dal pericolo delle esplosioni possono essere classificati rispetto alla geometria rappresentata dal rapporto tra lunghezza e diametro (equivalente) (Eckhoff 2003):

ID.	L/D	***Contenitore***
01	$L/D < 4$	Compartimenti grandi senza attrezzature all'interno
02	$L/D > 4$	Contenitori grandi snelli e allungati (silos)
03		Contenitori piccoli allungati
04	$L/D \ll 1$	Contenitori intermedi (10-25 m^3)
05	$L/D \gg 1$	Contenitori allungati (condotti, tubi e gallerie)
06	Attrezzature	Cicloni[z]
07		Filtri

Tabella 5-4 Classificazione dei contenitori ai fini della protezione con supoerfici di sfogo.

[z] I cicloni sono grandi tubi a forma di imbuto costruiti con lamiere metalliche e collegati a condotti spesso utilizzati nelle falegnamerie, nelle officine meccaniche, negli impianti di produzione e negli impianti di trasformazione delle polveri. Polvere e detriti sono aspirati dall'alto. L'aria contenente le polveri è soffiata fuori dall'altro lato della parte superiore, mentre le particelle di polvere cadono su una tramoggia in basso.

Abbiamo considerato il coefficiente di espansione pari al valore $E = E_{\min} = \frac{P_{MAX}}{p_0} \cong P_{MAX}$ e quindi la (5.15) diventa:

$$\overline{S_F} = \frac{k_{st}}{\left(\frac{p_{\max}}{p_0}\right)^{1/\gamma}} \left[\frac{0{,}11}{p_{\max}^{0{,}14}} + 0{,}15u'_{RMS}\right] \qquad (5.17)$$

La sovrapressione di esplosione in un silos con innesco dell'esplosione dal basso, è pari a:

$$P_{ex} = p_{stat} + 6 \cdot \overline{S_F} \cdot K_{vent} \cdot \frac{L}{D} \qquad (5.18)$$

Conoscendo i livelli della turbolenza nelle attrezzature industriali durante il normale funzionamento, oppure il livello di turbolenza che si può prevedere nel caso di propagazione di un'esplosione secondaria, le due formule precedenti possono essere usate per calcolare la sovrapressione d'esplosione. Per questo è stata ricavata la seguente tabella che permette una valutazione approssimata dell'intensità di turbolenza in condizioni pratiche:

Tipologia impianto	**Volume**	**Intensità di turbolenza**	**Ricercatore (anno)**	**Note**
Silos	12 m³	$u'_{rms} = \frac{1}{2} 0{,}072U_{flow}$	Hauert, Vogl 1995	Turbolenza sull'asse del silos - Sistema di alimentazione pneumatico assiale 75 mm
Silos	12 m³	$u'_{rms} = 0{,}16U_{flow} \mathrm{Re}^{-1/8}$		Codice FLUENT
Silos	12 m³	$u'_{rms} = 0{,}4\, m/s$ $u'_{rms} = 0{,}5\, m/s\ coclea$		Sistema di alimentazione tangenziale pneumatico
Contenitore Sferico	1,3 m³	$u'_{rms} = 1{,}286(t - 0{,}34)^{-0{,}803} \quad t \geq 0{,}4s$	Tamanini 1998	

Tipologia impianto	Volume	Intensità di turbolenza	Ricercatore (anno)	Note
Compartimento	64 m³	$u'_{rms} = \begin{cases} 21,87 - 17,30t & t \leq 0,73s \\ 3,72t^{-2,78} & t > 0,73s \end{cases}$		
Silos	12 m³	$u'_{rms} = 7,70e^{-2,16t} + 0,85$	Hauert et al. 1996	Ugelli perforati posi a quattro differenti altezze
n. 04 Essiccatori $L/D \ll 1$	6÷310 m³	$1\, m/s \leq u'_{rms} \leq 2\, m/s$	Siwek et al. 2004	Misurazione nella parte bassa dell'attrezzatura

Tabella 5-5 Riepilogo delle formule utili per il calcolo dell'intensità i turbolenza nei contenitori e nelle attrezzature

La Commissione per la protezione delle esplosioni della NFPA ha deciso di sviluppare una semplice relazione approssimata che lega l'intensità di turbolenza (supposta pari a $0,1\frac{m}{s}$) ed il flusso di aria nell'attrezzatura di processo:

$$u'_{RMS} = \frac{\max(v_{axial}, v_{\tan})}{10}$$

Di solito l'asse delle attrezzature di processo è verticale.

Ci sono molte attrezzature che operano con valori di intensità di turbolenza inferiore a 0,2 m/s. questa attrezzature, com'è stato dimostrato da misurazioni e calcoli non necessitano dell'aumento dell'area di sfogo secondo la norma NFPA 68.

Per estendere la (5.18) a volumi quasi cubic ($L/D \approx 1$), essa rimane utilizzabile se consideriamo che in un silos, l'accensione avvenisse al centro, invece che ad un'estremità, la fiamma accelerebbe, ma la metà rispetto all'innesco dal fondo. Infatti i risultati di esperimenti mostrano che in questo caso, a parità di altre condizioni, si ottengono valori di sovrapressione d'esplosione, all'incirca la metà. Quindi possiamo continuare ad utilizzare la formula suddetta, nella forma:

$$P_{ex} = p_{stat} + 3 \cdot \overline{S_F} \cdot K_{vent} \cdot \frac{L}{D} \qquad (5.19)$$

Le due formule (5.18) e (5.19) non sono più applicabili quando le geometrie diventano particolari e quando i flussi al loro interno sono complessi. In questo caso vengono in soccorso i codici di calcolo.

5.7 CORRELAZIONE PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE SUPERFICI DI SFOGO

La formula per il dimensionamento delle superfici di sfogo è ottenuta invertendo la precedente formula (5.18). Infatti se supponiamo nota la sovrapressione d'esplosione, che nel dimensionamento delle superfici di sfogo non può superare la pressione ridotta, p_{red}, conoscendo gli altri parametri necessari per il dimensionamento, ricordando che $K_{vent} = A_{top} / A_{vent}$ possiamo ricavare la superficie di sfogo:

$$\begin{cases} A_{vent} = \dfrac{6 \cdot \overline{S_F} \cdot L / D}{(p_{red} - p_{stat})} \cdot A_{top} \\ \overline{S_F} = \dfrac{k_{st}}{\left(\dfrac{p_{max}}{p_0} \right)^{1/\gamma}} \left[\dfrac{0,11}{p_{max}^{0,14}} + 0,15 u'_{RMS} \right] \end{cases} \qquad (5.20)$$

È stata eseguita una verifica della formula precedente, utilizzando i dati sperimentali reperiti nella letteratura scientifica, su prove eseguite principalmente in silos. Infatti nelle cinque Tabelle seguenti è stato riportato il valore dell'area di sfogo ottenuto applicando la (5.20); il confronto con i valori misurati ha mostrato uno scarto trascurabile ai fini del dimensionamento delle superfici di sfogo:

Volume e Tipo Attrezzatura	9.4 m^3 silo—(12 m^3 riempito parzialmente)								(Hauert & Vogl, 1995; Hauert et al., 1996)		
				Polvere:	Amido di mais						
k_{st}	140										
P_{max} (bar g)	9										
u^0_{rms}	2,1					0,80					
Sistema di dispersione:	Anello per dispersione perforato					Dispersione pneumatica in direzione assiale da tubazione dall'alto del silo					
Tempo dell'innesco	VDI 3673→ 0,85 s					Innesco durante la fase di dispersione					
A_top (m^2)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Pvent (mbar g)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
L/D	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
K_vent	6.7	6.7	4	4	2.68	13.4	13.4	4	4	6.7	6.7
P_red (mbar g)	1525	1550	825	893	537	1550	1502	332	427	648	743
A_vent (m^2)	**0.3**	**0.3**	**0.5**	**0.5**	**0.75**	**0.15**	**0.15**	**0.5**	**0.5**	**0.3**	**0.3**

Tabella 5-6 Prova su silos V = 9.4 m^3

Volume e Tipo Attrezzatura	20 m³ silo								(Eckhoff, 1997)		
				Polvere:		Amido di mais					
k_{st}	226										
P_{max} (bar g)	10,3										
u^0_{rms}	0,80					1,5					
Sistema di dispersione:	Dispersione pneumatica in direzione assiale da tubazione dall'alto del silo					Anello per dispersione perforato					
Tempo dell'innesco	Innesco durante la fase di dispersione					VDI 3673→ 0,90 s					
A_top (m^2)	2	2	2	2		2	2	2	2		
Pvent (mbar g)	100	100	100	100		100	100	100	100		
L/D	6.25	6.25	6.25	6.25		6.25	6.25	6.25	6.25		
K_vent	1.54	1.74	2.5	4		1	1.33	2.5	4		
P_red (mbar g)	500	723	900	1445		600	600	1250	1783		
A_vent (m^2)	1.3	1.15	0.8	0.5		2	1.5	0.8	0.5		

Tabella 5-7 Prova su Silos da 20 m³. L'intensità di turbolenza, nel caso della dispersione con anello perforato, è stato derivato dal dato corrispondente della tabella 5-6. Infatti, poiché entrambi i silos hanno lo stesso diametro (1,6 m), ma lunghezze differenti (5 m e 10 m rispettivamente), avendo il silos di 12 m³ quattro file di anelli dispersori, quello di 20 m³ ne avrà 8 file per produrre lo stesso livello di turbolenza. Invece, poiché quest'ultimo ne ha soltanto 6 file e quindi possiamo supporre che la turbolenza possa essere valutata come: 2.1*(6/8)= 1.5 m/s (Bartknecht, 1985).

Volume e Tipo Attrezzatura	500 m³ silo (Eckhoff, 1997; Eckhoff & Fuhre, 1984)										
Polvere:	Semi di grano					Polvere:		Amido di mais			
k_{st}	88					115					
P_{max} (bar g)	7					7,5					
u^0_{rms}	0					1,5	(Velocità ipotetica)				
Sistema di dispersione:	Dispersione pneumatica in direzione assiale da tubazione dall'alto del silo					Dispersione pneumatica in direzione assiale da tubazione dall'alto del silo					
Tempo dell'innesco	Innesco dopo alcuni sec dalla formazione di una nube "ferma"					Innesco durante la fase di dispersione					
A_top (m^2)	23.07	23.07	23.07	23.07	23.07	23.07					
Pvent (mbar g)	10–20	10–20	10–20	10–20	10–20	10–20					
L/D	4	4	4	4	4	4					
K_vent	11.54	7.21	6.78	4.79	2.66	2.66					
P_red (mbar g)	435	470	300	249	126	550	Getto turbolento dall'apertura in alto del silo				
A_vent (m^2)	2.00	3.2	3.4	4.82	8.8	8.8					

Tabella 5-8 Prova su Silo 500 m³

Volume e Tipo Attrezzatura	236 m³ -silos					Volume e Tipo Attrezzatura	20 m3 - silos				
					Polvere:	Amido di mais					
k_{st}	226										
P_{max} (bar g)	10,3										
u^0_{rms}	0,3	(Velocità ipotetica)				0,8					
Sistema di dispersione:	Dispersione pneumatica in direzione assiale da tubazione dall'alto del silo					Dispersione pneumatica in direzione assiale da tubazione dall'alto del silo					
Tempo dell'innesco	Innesco dopo alcuni sec dalla formazione di una nube "ferma"					Innesco durante la fase di dispersione					
A_top (m^2)	10.67					2					
Pvent (mbar g)	100					100					
L/D	6					6.25					
K_vent	3.05					4					
P_red (mbar g)	770					1330					
A_vent (m^2)	3.4					0.5					

Tabella 5-9 Silos V = 236 m³ -

Volume e Tipo Attrezzatura	V =0.074 m³ – Camera di prova snella							(Scheid et al., 2006)			
				Polvere:	Amido di mais (10 – 20 μm)						
k_{st}	41										
P_{max} (bar g)	6,44										
u^0_{rms}	0	0.225*	0	0.225*	0	0.225*	0.16*	0.16*	0.16	0.16*	
Sistema di generazione :	n. 16 giranti equidistanziate su 4 file										
Della turbolenza											
A_top (m^2)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	
Pvent (mbar g)	145	145	125	125	70	70	145	125	70	125	
L/D	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	
K_vent	54.4	54.4	35,3	35,3	18,12	18,12	54,4	35,3	18,2	35,3	
P_red (mbar g)	866	1470	612	1000	280	577	1160	800	415	770	
A_vent (m^2)	0,0013	0,0013	0,002	0,002	0,0039	0,0039	0,0013	0,002	0,0039	0,002	

Tabella 5-10 Prova su– Camera di prova snella V =0.074 m³

BIBLIOGRAFIA DI SEZIONE

[1] Andrews, G. E., & Bradley, D. (1972). Determination of burning velocities: a critical review. Combustion and Flame, 18, 133–153.

[2] Ballal, D. R. (1983). Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity. Proceedings of the Royal Society of London, A385, 21–51.

[3] Bartknecht, W. (1985). Effectiveness of explosion venting as a protective measure for Silos. Plant/Operations Progress, 4(1).

[4] Bjerktvedt, D., Bakke, J. R., & van Wingerden, K. (1997). Gas explosion handbook. Journal of Hazardous Materials, 52, 1–150.

[5] Botha, J. P., & Spalding, D. B. (1954). The laminar flame speed of propane/air mixtures with heat extraction from the flame. Proceedings of the Royal Society of London, A225, 71–96.

[6] Bradley, D., Chen, Z., & Swithenbank, J. R. (1988). Burning rates in turbulent fine dust–air explosions. Proceedings of the 22nd international symposium on combustion (pp. 1767–1775).

[7] Bradley, D., & Lee, J. H. S. (1984). Proceedings of the first international colloquium on the explosibility of industrial dusts (Vol. 2, pp. 220–223).

[8] Cassel, H. M. (1964). Some fundamental aspects of dusts flames. Report Inv. 6551, US Bureau of Mines, Washington.

[9] Dahoe, A. E., & de Goey, L. P. H. (2003). On the determination of the laminar burning velocity from closed vessel gas explosions. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 16, 457–478.

[10] Dahoe, A. E., Hanjalic, K., & Scarlett, B. (2002). Determination of the laminar burning velocity and the Markstein length of powder–air flames. Powder Technology, 122, 222–238.

[11] Dahoe, A. E., Zevenbergen, J. F., Lemkowitz, S. M., & Scarlett, B. (1996). Dust explosions in spherical vessels: The role of flame thickness in the validity of the “cube-root law”. Journal of Loss Prevention in Process Industries, 9, 33–44.

[12] Eckhoff, R. K., & Fuhre, K. (1984). Dust explosion experiments in a vented 500 m3 silo cell. Journal of Occupational Accidents, 6, 229–246.

[13] Gieras, M., Glinka, W., Klemens, R., & Wolanski, P. (1995). Investigation of flame structure during laminar and turbulent burning in dust–air mixtures. Conference on dust explosions. Protecting people, equipment, buildings and environment (pp. 168–224).

[14] Gieras, M., Klemens, R., & Wolanski, P. (1996). Evaluation of turbulent burning velocity for dust mixtures. Proceedings of the seventh international colloquium on dust explosions (pp. 535–551), Bergen, Norway.

[15] Glinka, W., Wang, X., Wolanski, P., & Xie, L. (1996). Velocity and structure of laminar dust flames. Proceedings of the seventh interna-tional colloquium on dust explosions (pp. 61–68), Bergen, Norway.

[16] Goroshin, S., Mamen, J., Lee, J., & Sacksteder, K. (2005). Ground-based and microgravity study of flame quenching distance in metal dust suspension. In Proceedings of the 20th international colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems, McGill University, Montreal, Canada.

[17] Han, O. S., Yashima, M., Matsuda, T., Matsui, H., Miyake, A., & Ogawa,

[18] Harris, R. J. (1983). The investigation and control of gas explosions in buildings and heating plants. London, New York: E & FN Spoon Ltd.

[19] Hauert, F., & Vogl, A. (1995). Measurement of dust cloud characteristics in industrial plants. Final technical report: Protecting people, equipment, buildings and environment against dust explosions—CREDIT Project.

[20] Hauert, F., Vogl, A., & Radandt, S. (1996). Dust cloud characterization and its influence on the pressure–time history in silos. Process Safety Progress, 15, 178–184.

[21] Horton, M. D., Goodson, F. P., & Smoot, L. D. (1977). Characteristics of flat, laminar coal dust flames. Combustion and Flame, 28, 187–195.

[22] Kaesche–Krischer, B. (1959). Untersuchungen an Vorgemischte, Lami-nairen Staub/Luft-Flammen. Staub, 19, 200–203.

[23] Kolbe, M. (2001). Laminar burning velocity measurements of stabilized aluminium dust flames. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.

[24] Krause, U., & Kasch, T. (2000). The influence of flow and turbulence on flame propagation through dust–air mixtures. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 291–298.

[25] Krause, U., Kasch, T., & Gebauer, B. (1996). Velocity and concentration effects on the laminar burning velocity of dust–air mixtures. Proceedings of the seventh international colloquium on dust explosions, Bergen, Norway (pp. 51–54).

[26] Lewis, B. (1954). Selected combustion problems. AGARD (Butterworths)

[27] Mazurkiewicz, J., & Jarosinski, J. (1990). Temperature and laminar burning velocity of Cornstarh dust–air flames. Proceedings of the fourth international colloquium on dust explosions. Poland: Porabka-Kozubnik.

[28] Mazurkiewicz, J., & Jarosinski, J. (1991). Investigation of burning properties of cornstarch dust–air flames. In Grain dust explosions and control, Warschau (pp. 63–90).

[29] Mazurkiewicz, J., & Jarosinski, J. (1994). Investigation of a laminar cornstarch dust–air flame front. In Proceedings of the sixth interna-tional colloquium on dust explosions (pp. 179–185). Shenyang: North-eastern University Press.

[30] Metghalchi, M., & Keck, J. C. (1982). Burning velocities of mixtures of air with methanol isooctane, and indolene at high pressure and temperature. Combustion and Flame, 48, 191–210.

[31] Milton, B. E., & Keck, J. C. (1984). Laminar burning velocities in stoichiometric hydrogen and hydrogen–hydrocarbon gas mixtures. Combustion and Flame, 58, 13–22.

[32] Pedersen, L. S., & van Wingerden, K. (1995). Measurement of fundamental burning velocity of dust–air mixtures in industrial situations. In Dust explosions, protecting people, equipment, buildings and environment (pp. 140–167). British Materials Handling Board.

[33] Pritchard, D. K., Allsopp, J. A., & Eaton, G. T. (undated). Gas explosion venting in elongated enclosures. Paper presented at /www. safetynet.de

[34] Proust, C. (1993). Experimental determination of the maximum flame temperatures and of the laminar burning velocities for some combustible dust–air mixtures. In Proceedings of the fifth international colloquium on dust explosions, Pultusk, Poland (pp. 161–175).

[35] Proust, C. (2006). Flame propagation and combustion in some dust–air mixtures. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, 89–100.

[36] Proust, C., Roux, P., & Chhuon, B. (2000). [illegible] voir les Effects des Explosions de Poussie` res sur l’Environnement. EFFEX, un Outil de Simulation. INERIS/DRA 22751 (pp. 1–50).

[37] Proust, C., & Veyssiere, B. (1988). Fundamental properties of flames propagating in starch dust–air mixtures. Combustion Science and Technology, 62, 149–172.

[38] Pu, Y. K., Jarosinski, J., Johnson, V. G., & Kauffman, C. W. (1990). Turbulence effects on dust explosion in the 20-l spherical vessel. In Proceedings of the 23rd international symposium on combustion (pp. 843–849). Pittsburgh: The Combustion Institute.

[39] Pu, Y. K., Jarosinski, J., Tai, C. S., Kauffman, C. W., & Sichel, M. (1988). The investigation of the feature of dispersion induced turbulence and its effects on dust explosions in closed vessels. In Proceedings of the 22nd international symposium on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (pp. 1777–1787).

[40] Pu, Y. K., Jia, F., Wang, S. F., & Skjold, T. (2007). Determination of the maximum effective burning velocity of dust–air mixtures in constant volume combustion. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 20, 462–469.

[41] Pu, Y. K., Lee, Y. C., Kauffman, C. W., & Bernal, L. P. (1989). Determination of turbulence parameters in closed explosion vessel. In 12th international colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems, Ann Arbor, MI (pp. 107–123).

[42] Rasbash, D. J., & Rogowski, Z. W. (1960). Relief of explosions in duct systems. In Proceedings of the first symposium on chemical process hazards (pp. 58–65). England, London: Institution of Chemical Engineers.

[43] Rasbash, D. J., & Rogowski, Z. W. (1961). Gaseous explosions in vented ducts. Combustion and Flame, 4, 301–312.

[44] Rasbash, D. J., & Rogowski, Z. W. (1963). Relief of explosions in propane-air mixtures moving in a straight unobstructed duct. In Proceedings of the second symposium on chemical process hazards with special reference to plant design. England, London: Institution of Chemical Engineers.

[45] Scheid, M., Geissler, A., & Krause, U. (2006). Experiments on the influence of pre-ignition turbulence on vented gas and dust explosions. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, 194–199.

[46] Silvestrini, M. (2004). Esplosioni di Polveri nell'Industria: Sorgenti d'Ignizione - Combustione Turbolenta. Tesi, Scuola di Specializzazione in "Sicurezza e Protezione," Universita` degli Studi di Roma "La Sapienza," Italy, Rome.

[47] Siwek, R. (1988). Reliable determination of safety characteristics in the 20¬litre apparatus. Proceedings of Conference on Flammable Dust Explosions, November 2–4, St. Louis, Missouri.

[48] Siwek, R., van Wingerden, K., Hansen, O. R., Sutter, G., Kubainsky, Chr., Schwartzbach, Chr., Giger, G., & Meili, R. (2004). Dust explosion venting and suppression of conventional spray dryers. From the final research report "Explosion Protection of Conventional Spray Dryers" (Van Wingerden, K. and Siwek, R., Final Research Report 2004).

[49] Skjold, T. (2003). Selected aspects of turbulence and combustion in 20-l explosion vessels. Thesis, Department of Physics of University of Bergen, Norway.

[50] Tai, C. S., Kauffman, C. W., & Sichel, M. (1988). Turbulent dust combustion in a jet-stirred reactor. Progress in Astronautics and Aeronautics, 113, 62–86.

[51] Tezok, F. I., Kauffman, C. W., Sichel, M., & Nichols, J. A. (1986). Turbulent burning velocity measurements for dust–air mixtures in a constant volume spherical bomb. Progress in Astronautics and Aeronautics, 105, 184–195.

[52] Tite, J. P., Binding, T. M., & Marshall, M. R. (1991). Explosion relief for long vessels. Paper presented at the conference on fire and explosion hazards, Moreton-in-Marsch, April.

[53] Veynante, D., & Vervisch, L. (2002). Turbulent combustion modelling. Progress in Energy and Combustion Science, 28, 193–266.

[54] Wang, S., Pu, Y., Jia, F., Gutkowski, A., & Jarosinski, J. (2006). An experimental study on flame propagation in cornstarch dust clouds. Combustion Science and Technology, 178, 1957–1975.

[55] Zevenbergen, J. F. (2004). Turbulent burning velocity measurements in 20-l sphere. DESC project. The Explosion Group of Delft University of Technology.

CONCLUSIONI

In questa ricerca, è stato affrontato lo studio delle esplosioni di polveri organiche naturali. Dapprima sono stati introdotti i concetti e le grandezze fondamentali per capire il fenomeno, che comprende aspetti fisici e chimici. In particolare è stato messo in risalto il fenomeno della combustione turbolenta, che ha un ruolo incisivo nell'evoluzione delle esplosioni secondarie, che hanno gli effetti più gravi tra le esplosioni di polveri. Questo accade perché la turbolenza, difficile da descrivere matematicamente, innesca un fenomeno di combustione autoaccelerante.

Uno dei metodi per la protezione dalle esplosioni di polveri è l'utilizzo di superfici di sfogo della sovrapressione generata durante l'esplosione. Tuttavia le norme tecniche utilizzate per proteggersi dalle esplosioni con le superfici di sfogo forniscono scarse indicazioni dirette sull'influenza del flusso turbolento sul dimensionamento di queste superfici. Inoltre essi tendono a stimare in eccesso l'area geometrica da destinare allo sfogo dell'esplosione di polveri combustibili. Questo accade perché le correlazioni utilizzate dalle norme tecniche inviluppano i casi peggiori risultati dalle prove effettuate in laboratorio e su scala reale.

Per superare questa limitazione delle norme N.F.P.A. e V.D.I., sono state cercate delle correlazioni empiriche, partendo dalla velocità di combustione, che è un parametro che descrive le condizioni della combustione: la validità di questa formula è stata provata attraverso il confronto con i dati sperimentali ricavati dalla letteratura scientifica sull'argomento. Poi abbiamo ricavato una correlazione empirica per il dimensionamento di superfici di sfogo di attrezzature industriali allungate e quasi cubiche. Questa formula è stata confrontata con i risultati forniti dalle norme tecniche NFPA e VDI.

L'ulteriore lavoro consisterà nell'indagare il flusso, originato da una esplosione primaria, che fuoriesce dalla superficie di sfogo di un'attrezzatura, allorché il sistema di chiusura è stato rimosso, come accade nel fenomeno delle esplosioni secondarie: la conoscenza del flusso alle spalle dell'onda di pressione in moto serve a prevedere il trascinamento delle particelle di polvere contenute nel volume "secondario". In questo modo si potrà utilizzare la formula che predice la sovrapressione dell'esplosione secondaria per il dimensionamento delle superfici di sfogo del volume "secondario".

LISTA SIMBOLI E TERMINOLOGIA

Simbolo	Unità	Italiano	Inglese
k_{st}	bar m/s	Indice di esplosività	
P_{max}	(bar g)	Massima sovrapressione d'esplosione	Maximum explosion pressure
$\left[\frac{dp}{dt}\right]_{MAX}$	(bar /s)	Massima Velocità di crescita della pressione	Maximum rate of prtessure rise
S_{uL}, S_{uT}	(m/s)	Velocità di combustione laminare, V.c. turbolenta	
S_F, S_{Fmean}	(m/s)	Velocità di fiamma V.f. media	
C_{Lam}		Costante	
C_{Turb}		Costante	
D	(m)	Diametro	
E		Fattore d'espansione	
E_0		Fattore d'espansione a pressione ambiente	
E_{min}		Fattore d'espansione alla fine di una compressione adiabatica	
C		Costante	
K_{vent}		Coefficiente caratteristico dello sfogo	
L	(m)	Lunghezza del contenitore	
p_0	(bar)	Pressione atmosferica	
p	(bar)	Pressure assoluta	
P_{ex}	(bar g)	Pressione d'esplosione all'interno di un contenitore	
P_{vent}	(bar g)	Sovrapressione di attivazione dello sfogo	
r	(m)	Raggio del reattore di prova	
S_u	(m/s)	Velocità di combustione	
$S_{0\ CL}$	(m/s)	Velocità di combustione a pressione e temperatura ambiente	
S_{Fmean}	(m/s)	Velocità del fronte di fiamma media	
S_F	(m/s)	Velocità del fronte di fiamma	
t	(s)	tempo	
T_0	(K)	Temperatura ambiente	
T_b	(K)	Temperatura dei prodotti della reazione di combustione	
T_U	(K)	Temperatura dei reagenti della reazione di combustione	
T_{ad} T_b	(K)	Temperatura adiabatica della fiamma	

Simbolo	Unità	Italiano	Inglese
u'_{RMS}	(m/s)	Valore quadratico medio della componente turbulenta della velocità	
V	(m^3)	Volume del contenitore	
γ	----	Rapporto dei calori specifici a pressione e a volume costante dei reagenti (1,4 per l'aria)	
ρ_0	(kg/m3)	Densità iniziale della nube di polvere ed aria	
ρ_u	(kg/m3)	Densità della nube di polvere ed aria prima della reazione di combustione	
ρ_b	(kg/m3)	Densità della nube di polvere ed aria dopo la reazione di combustione	
$\rho_{u,f}$	(kg/m3)	Densità della nube di polvere ed aria prima di una reazione di combustione isocora	
$\rho_{b,f}$	(kg/m3)	Densità della nube di polvere ed aria dopo una reazione di combustione isocora	
$A_{\in 68}$	(m^2)	Aea geometrica di sfogo ottenuta dalla norma NFPA68-2007	
$A_{\in_\varepsilon\xi\pi}$	(m^2)	Aea geometrica di sfogo utilizzata nelle prove sperimentali	

TERMINOLOGIA TERMINI TECNICI

ITALIANO	INGLESE
Contenitore dotato di resistenza alla pressione interna	Vessel
Protezione con superficie di sfogo	Venting
Onda (=Perturbazione) di pressione che si propaga in aria a seguito di un'esplosione	Blast wave
Onda di pressione che si propaga in aria a seguito di una deflagrazione	Pressure wave
Onda di pressione che si propaga in aria a seguito di una detonazione	Shock wave
Ugello ad anello	Ring nozzle
Reattore di prova	20 l Sphere, 1 m^3 Vessel
Sezionamento	Isolation
Macinazione molatura di una sostanza (lavorazione meccanica)	Grinding
Cereali	Grain
Mulino	Mill
Strato di polvere	Dust layer
Grano	Wheat
Tramoggia	Hopper